Universidade de São Paulo
Faculdade de Saúde Pública

Critérios para identificação de veículos leves do ciclo Otto com elevadas emissões, utilizando dispositivo de sensoriamento remoto.

Antonio de Castro Bruni

Tese apresentada ao Programa de Pós Graduação em Saúde Pública da Faculdade de Saúde Pública da Universidade de São Paulo como requisito para obtenção do título de Doutor em Ciências.

Área de Concentração: Saúde Ambiental

Orientador: Prof. Dr. **João Vicente de Assunção**

São Paulo

Março de 2018

Critérios para identificação de veículos leves do ciclo Otto com elevadas emissões, utilizando dispositivo de sensoriamento remoto.

Antonio de Castro Bruni

Tese apresentada ao Programa de Pós Graduação em Saúde Pública da Faculdade de Saúde Pública da Universidade de São Paulo como requisito para obtenção do título de Doutor em Ciências.

Área de Concentração: Saúde Ambiental

Orientador: Prof. Dr. **João Vicente de Assunção**

Versão Revisada

São Paulo

Março de 2018

É expressamente proibida a comercialização deste documento, tanto na sua forma impressa quanto na eletrônica. Sua reprodução, total ou parcial, é permitida somente para fins acadêmicos e/ou científicos, desde que na reprodução figure a identificação do autor, o título, a instituição e o ano da publicação da tese.

Dados Internacionais de Catalogação

B92c Bruni, Antônio de Castro
 Critérios para identificação de veículos leves do ciclo Otto com elevadas emissões, utilizando dispositivo de sensoriamento remoto / Antônio de Castro Bruni ; Orientador Prof. Dr. João Vicente de Assunção. – 2018.
 153 p:il. ; 30 cm

 Tese (Doutorado em Ciências) - Programa de Pós-Graduação em Saúde Pública, Faculdade de Saúde Pública, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2018.
 Disponível também em: <<http://www.teses.usp.br/>>.

 1. Carbono – monóxido 2. Hidrocarbonetos 3. Nítrico – óxido 4. Poluição veicular 5. PROCONVE 6. Programa I/M 7. Sensoriamento remoto 8. Veículo – frota – caracterização 9. Veículo – potência específica 10. Veículos automotores - leves – ciclo Otto. 11. Veículos – Emissões – Elevadas. I. Assunção, João Vicente de, orient. II. Título.

"Deixem que o futuro diga a verdade e avalie cada um de acordo com o seu trabalho e realizações. O presente pertence a eles, mas o futuro, pelo qual eu sempre trabalhei, pertence a mim."

Nicola Tesla

Universidade de São Paulo

Januário

ATA DE DEFESA

Aluno: 6134 - 119235 - 2 / Página 1 de 1

Ata de defesa pública de Tese do(a) Senhor(a) Antonio de Castro Bruni no Programa: Saúde Pública, do(a) Faculdade de Saúde Pública da Universidade de São Paulo.

Aos 12 dias do mês de março de 2018, no(a) Sala Cyro Clari realizou-se a Defesa da Tese do(a) Senhor(a) Antonio de Castro Bruni, apresentada para a obtenção do título de Doutor Indulada:

"Critérios para identificação de veículos leves do ciclo Otto com elevadas emissões, utilizando dispositivo de sensoriamento remoto"

Após declarada aberta a sessão, o(a) Sr(a) Presidente passa a palavra ao candidato para exposição e a seguir aos examinadores para as devidas arguições que se desenvolvem nos termos regimentais. Em seguida, a Comissão Julgadora proclama o resultado:

Nome dos Participantes da Banca	Função	Síglas da CPG	Resultado
João Vicente de Assunção	Presidente	RSP - USP	<u>Prova de</u>
Viviana Giampaoli	Titular	IME - USP	<u>Prova de</u>
Helena Ribeiro	Titular	FSP - USP	<u>Prova de</u>
Francisco Emilio Baccaro Nigro	Titular	EP - USP	<u>Prova de</u>
Vanderlei Borsari	Suplente	Externos	<u>Prova de</u>

Resultado Final:

Parecer da Comissão Julgadora *

Eu, Carolina Cardoso Bertoni Massucato, lavrei a presente Ata, que assino juntamente com os(as) Senhores(as) São Paulo, aos 12 dias do mês de março de 2018.

Viviana Giampaoli

Helena Ribeiro

Francisco Emilio Baccaro Nigro

Vanderlei Borsari

João Vicente de Assunção
Presidente da Comissão Julgadora

* Obs: Se o candidato for reprovado por algum dos membros, o preenchimento do parecer é obrigatório.

AGRADECIMENTOS

Sou grato às pessoas que me apoiaram no desenvolvimento deste projeto de tese. Ao Prof. Dr. João Vicente de Assunção, meu orientador, que há muito acompanha e auxilia meu desenvolvimento acadêmico e profissional.

Aos membros da banca, pelas valiosas sugestões para o aprimoramento deste trabalho.

À CETESB, na figura dos meus gerentes Marcelo Pereira Bales e Vanderlei Borsari, pelo estímulo para que eu desenvolvesse este projeto.

Ao Eng. Gabriel Murgel Branco, que me introduziu no tema de Poluição Veicular na CETESB e que viabilizou a utilização dos dados de sensoriamento remoto obtidos pela empresa *Remote Sensing do Brasil* neste projeto.

À BR Inspeções Ltda. por ter cedido os dados de sensoriamento remoto utilizados nesta tese.

À Secretaria do Verde e do Meio Ambiente da PMSP que disponibilizou os dados das inspeções veiculares ambientais efetuadas pelo Programa de Inspeção e Manutenção da Cidade de São Paulo, referente aos exercícios de 2009 e 2010 de todos os automóveis leves do ciclo Otto.

Aos Professores Doutores Sérgio Wechsler e Viviana Giampaoli, ambos docentes do IME-USP, pelos conhecimentos passados em Modelagem Estatística, fundamentais ao desenvolvimento deste trabalho.

Aos Engs. Manoel Paulo de Toledo [*in memoriam*] e Moacir Ferreira da Silva pelo enorme incentivo para que eu voltasse a estudar e encarasse o desafio de produzir esta tese.

RESUMO

BRUNI, Antonio de Castro. **Critérios para identificação de veículos leves do ciclo Otto com elevadas emissões, utilizando sensoriamento remoto**. 2018, 153p. Tese (Doutorado em Ciências) – Faculdade de Saúde Pública, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2018.

Ocorrem anualmente aproximadamente 600.000 mortes de crianças com até cinco anos, no mundo. Pneumonia é a principal causa e mais de 50% destas mortes são atribuídas à poluição do ar. Ela ainda é responsável pelo aumento do risco de infecções respiratórias, asma, condições neonatais adversas e anomalias congênitas. A poluição do ar também afeta o desenvolvimento cognitivo de crianças e induz o desenvolvimento de doenças crônicas na idade adulta. Entre 70 e 80% da poluição do ar em nações em desenvolvimento são de origem veicular. Objetivando definir critérios baseados em medições com sensoriamento remoto para identificação de veículos automotores leves do ciclo Otto com elevadas emissões de monóxido de carbono, hidrocarbonetos ou óxido nítrico, foram utilizados os dados secundários gerados pela *Remote Sensing do Brasil Ltda* dos quais foram selecionados 179.142 veículos em uso da frota circulante da cidade de São Paulo com medições completas dos índices de emissão dos poluentes monóxido de carbono (CO), hidrocarbonetos (HC) e óxido nítrico (NO) e ainda velocidade e aceleração do veículo quando da medição e inclinação da pista no local escolhido para as medições.

Foram ajustados modelos estatísticos da classe *Generalised Additive Models for Location, Scale and Shape* (GAMLSS) visando testar a influência do Tipo de Combustível, da Potência Específica do Veículo (VSP) e das Fases do Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores (Proconve) sobre as emissões de CO, HC e NO, medidos usando o *Remote Sensing Device* (RSD). As emissões foram então conceitualmente subdivididas em dois grupos: veículos com emissões *normais* e com emissões *anormais*, isso para os diversos poluentes em veículos das Fases L3, L4 e L5 que são as fases de interesse para o gerenciamento da qualidade do ar. Variáveis *latentes* foram definidas para indicarem as distribuições dos veículos em relação a esses grupos e Fases. O algoritmo *Expectation-Maximization* (EM) foi empregado para identificação dos parâmetros das distribuições. Para determinação dos valores associados aos veículos com elevadas emissões de determinado poluente e fase do Proconve, foi empregado o percentil 98% da distribuição ajustada para os veículos dos grupos com emissões *normais*. Assim sendo, o Erro de Tipo I foi fixado em 2% sendo que esse percentual foi estabelecido considerando o Erro de Tipo II, de apontar o veículo como tendo emissão *normal* quando na realidade trata-se de um *high emitter*. Através desta abordagem foram determinados os valores indicativos de veículos com elevadas emissões segundo o poluente e a Fase do Proconve. Os resultados apontaram decréscimo nas emissões de CO e de HC segundo as Fases do Proconve. Para o NO, o comportamento das emissões não acompanhou as reduções impostas pelas Fases do Proconve. Foi constatado que os veículos de 2005 a 2009, movidos exclusivamente a gasool, foram os que apresentaram as maiores emissões de NO. Diversos possíveis fatores causadores deste comportamento diferenciado do NO foram discutidos neste trabalho. Os dados

de qualidade do ar detectaram aumento significativo nas concentrações ambientais de Óxidos de Nitrogênio (NO_x) em 2007, quando foi monitorado este parâmetro no período de inverno, o que pode indicar a influência dos *high emitters*, mas necessita de estudos mais aprofundados para confirmação da causa deste comportamento.

Palavras chave: Proconve, poluição veicular, monóxido de carbono, hidrocarbonetos, óxido nítrico, potência específica do veículo, sensoriamento remoto, programa I/M, caracterização de frota, *high emitter*

ABSTRACT

BRUNI, Antonio de Castro. **Criteria for identification of Otto cycle light duty vehicles with high emissions, using remote sensing device**. 2018, 153p. Thesis (Doctor in Science) – Public Health School, University of São Paulo, São Paulo, Brazil, 2018.

Approximately 600,000 deaths occur worldwide annually for children up to five years of age. Pneumonia is the leading cause and more than 50% of these deaths are attributed to air pollution. It is still responsible for increased risk of respiratory infections, asthma, adverse neonatal conditions and congenital anomalies. Air pollution also affects the cognitive development of children and induces future development of chronic diseases in adulthood. In order to define criteria based on remote sensing measurements to identify Otto cycle light duty vehicles (LDV) with high emissions of carbon monoxide, hydrocarbons or nitric oxide it was used secondary data produced by Remote Sensing do Brasil Ltda, from which 179,142 in-use vehicles were selected, that belongs to the city of São Paulo's current fleet. All those vehicles had complete measurements of emission of carbon monoxide (CO), hydrocarbons (HC) and nitric oxide (NO), and also speed and acceleration of the vehicle during measurements, and slope of the track at the place chosen for the measurements. Statistical models of the *Generalized Additive Models for Location, Scale and Shape* (GAMLSS) class were adjusted to test the influence of fuel type, Vehicle Specific Power (VSP) and of the Brazilian Vehicle Emission Control Program [Proconve] phases on CO, HC and NO emissions, measured using *Remote Sensing Device* (RSD). The emissions were then conceptually subdivided into two groups: vehicles with *normal* and *abnormal* emission, for the various pollutants in vehicles of L3, L4 and L5 phases of Proconve, which were of interest for the air quality management. Latent variables were defined to indicate the distribution of vehicles in relation to those groups and phases. The algorithm *Expectation – Maximization* (EM) was employed to identify all parameters of the distributions. We use the 98% percentiles of the statistical distribution set, for vehicles of groups with normal emissions to determine the limit values for vehicles with high emissions of pollutants and Proconve Phase. Therefore, the Type I Error was set at 2% and this percentage was established considering the Type II Error to point the vehicle as having normal emission when in fact it is a high emitter. Through this approach, the indicative values of vehicles with high emissions according to the pollutant and the Proconve Phase were determined. Results of emissions measured with the RSD technique indicated a decrease in CO and HC emissions according to the Proconve Phase. For the NO, the emissions behavior did not follow the reductions imposed by the Proconve Phases. It was found that newer vehicles – year model from 2005 to 2009 – exclusively gasohol-powered vehicles, were the ones that presented the highest NO emissions. Several possible causative factors of this differential behavior of NO were discussed in this study. A significant increase in the environmental concentrations of Nitrogen Oxides (NO_x) was detected in 2007, when this parameter was monitored in the winter period. This may indicate the influence of the *high emitter* vehicles, but it requires a more in-depth cause-effect study for confirmation of this behavior.

Key words: Proconve, mobile source, vehicle emission, on-road measurement, vehicle specific power, remote sensing devices, I/M program, Vehicle fleet characteristics, high emitters, carbon monoxide, hydrocarbons, nitric oxide.

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	23
2.	OBJETIVOS	40
2.1	Objetivo Global	40
2.2	Objetivos Específicos	40
3.	MATERIAL E MÉTODOS	41
3.1	Metodologia	41
3.2	Processos de aquisição dos dados	42
3.2.1	Sensoriamento remoto	42
3.2.2	Programa I/M de São Paulo	43
3.2.2.1	Inspeções não computadorizadas	43
3.2.2.2	Inspeção computadorizada	43
3.3	Métodos de coleta de dados	44
3.4	Análises Quantitativas dos dados	44
3.4.1	Preparação das bases de dados	44
3.4.2	Análises estatísticas	45
3.5	Apresentação da tecnologia de Sensoriamento Remoto	47
3.5.1	O Princípio físico da medição	47
3.5.2	Formas de Medição	50
3.5.3	Tratamento dos Valores Negativos	50
3.5.4	A precisão dos resultados	51
3.5.5	Eliminação da interferência do vapor da água	51
3.6	O equipamento RSD4600	52
3.6.1	Componentes do sistema	52
3.6.2	O Novo equipamento RSD5000	57
3.7	A tecnologia de SR na avaliação das emissões veiculares	61
3.8	Requisitos e condições para validação das medições usando SR	63
3.9	Aplicações para o Sensoriamento Remoto	63
3.10	Filtros de dados	64
4.	RESULTADOS	68
5.	DISCUSSÃO	90
6.	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	110
7.	REFERÊNCIAS	112
	ANEXO A – Ofícios solicitando os dados	121
	ANEXO B – Curriculum Vitae – Lattes	123
	ANEXO C – Locais de amostragem utilizando o RSD	125
	ANEXO D – Padrões de emissão para veículos de passageiros na EU	127
	APÊNDICE A – Reprodução do artigo a ser submetido a revista	129
	APÊNDICE B – Avaliação dos ajustes e modelos finais por poluente	151

Lista de Figuras

Número	Título da Figura	página
Figura 1 -	Emissões relativas (%), por tipo de fonte de poluição do ar e poluente na RMSP em 2012	28
Figura 2 -	Pirâmide etária da população projetada para o Município de São Paulo em 2050 segundo o sexo	30
Figura 3 -	Concentrações de partículas (PNC) medidas em duas condições de velocidade em túnel de vento.	32
Figura 4 -	Taxas de Internações por Pneumonia na Cidade de São Paulo segundo as Faixas Etárias mais suscetíveis (Internações/10000)	33
Figura 5 -	Elementos de uma estratégia de controle da poluição veicular visando promover a saúde	34
Figura 6 -	Resultados das inspeções dos automóveis leves em 2011 por combustível	36
Figura 7 -	Desenho esquemático para a Lei de Beer-Lampard	48
Figura 8 -	Módulo Fonte e Receptor do Analisador de gases	53
Figura 9 -	Conjunto de espelhos dispostos em ângulo de 90º [Corner Cube Mirror]	53
Figura 10 -	Módulo detector de velocidade e aceleração do veículo [Detector/Emitter Bars]	54
Figura 11 -	Câmara de vídeo para captura da placa do veículo	54
Figura 12 -	Módulo dispensador de gases [Gas Dispenser Box]	55
Figura 13 -	Medidores de temperatura e pressão atmosférica ambiente	55
Figura 14 -	Computador com software integrado que grava os dados e a imagem do veículo	56
Figura 15 -	Monitoramento e Registro de ocorrências em tempo real	56
Figura 16 -	Sensor de presença para identificação da chegada de veículo	57
Figura 17 -	Disposição dos equipamentos para medição dos gases de escapamento	62
Figura 18 -	Fotos de alguns locais de amostragem em São Paulo - Capital	62
Figura 19 -	Distribuição conjunta da Velocidade (mph) e aceleração (mph/s) do IM240	65
Figura 20 -	Densidade da Velocidade e da aceleração do Ciclo praticado no IM240	66
Figura 21 -	Distribuição conjunta da Velocidade (Km/h) e aceleração (Km/h/s) do Remote Sensing	66
Figura 22 -	Densidade conjunta da Velocidade e Aceleração no Remote Sensing	67

Figura 23 -	Histograma do valor de VSP dos veículos da frota pesquisada	71
Figura 24 -	Evolução das emissões dos poluentes CO, HC e NO com o Ano-Modelo do veículo	72
Figura 25 -	Impacto das fases do Proconve nas emissões dos poluentes	73
Figura 26 -	Distribuição das emissões segundo a potência específica do veículo – VSP	74
Figura 27 -	Comportamento das emissões de CO segundo VSP e combustível	75
Figura 28 -	Comportamento das emissões de HC segundo VSP e combustível	76
Figura 29 -	Comportamento das emissões de NO segundo VSP e combustível	76
Figura 30 -	Emissões do CO segundo as Fases do Proconve e combustível	77
Figura 31 -	Emissões do HC segundo as Fases do Proconve e combustível	78
Figura 32 -	Emissões do NO segundo as Fases do Proconve e combustível	78
Figura 33 -	Histogramas dos índices de emissão de CO, HC e NO - dados transformados usando a função ln	79
Figura 34 -	Mistura de distribuições identificadas para os índices de CO – EM	86
Figura 35 -	Mistura de distribuições identificadas para os índices de HC – EM	86
Figura 36 -	Mistura de distribuições identificadas para os índices de NO – EM	87
Figura 37 -	Percentual de <i>High Emitters</i> em função do poluente e ano	91
Figura 38 -	Percentuais de Veículos com elevada emissão de CO por ano-modelo e combustível/tecnologia - 2009/2010	92
Figura 39 -	Percentual de Veículos com elevada emissão de HC por ano-modelo e combustível/tecnologia - 2009/2010	92
Figura 40 -	Percentual de Veículos com elevadas emissões de NO por ano-modelo e combustível/tecnologia – 2009/2010	93
Figura 41 -	Comportamento das emissões de NO em função da VSP, Ano-Modelo e Combustível	95
Figura 42 -	Comportamento das emissões de NO em função da VSP e Ano-Modelo	96
Figura 43 -	Comportamento das emissões de CO ₂ em função da VSP e Ano-modelo dos veículos	97
Figura 44 -	Evolução das concentrações médias de NO _x [µg/m ³] no Parque do Ibirapuera	99
Figura 45 -	Comportamento Normalizado do NO _x no Parque do Ibirapuera	100

Figura 46 -	Rosas de concentrações de NOx segundo o período do dia e dia útil ou final de semana	101
Figura 47 -	Análise de tendência usando metodologia Mann-Kendall para NOx no Parque do Ibirapuera - 2000 a 2015	102
Figura 48 -	Comportamento Conjunto Normalizado das concentrações ambientais de NOx , O ₃ e CO no Parque do Ibirapuera - 2000 a 2015	103
Figura 49 -	Evolução das concentrações médias de O ₃ [µg/m ³] no Parque do Ibirapuera - 2000 a 2015	104
Figura 50 -	Rosas de Concentração de Ozônio em função das estações do ano no Parque do Ibirapuera - Período de 2000 a 2015	105
Figura 51 -	Rosas de Concentrações de O ₃ em função de ser dia útil ou final de semana e período diurno/noturno	106
Figura 52 -	Análise de tendência usando metodologia Mann-Kendall para o O ₃ no Parque do Ibirapuera - 2000 a 2015	107
Figura 53 -	Resposta detectada pelo RSD na Europa para veículos a gasolina	108
Figura 54 -	Evolução dos Fatores Médios de Emissão de NO _x - automóveis a gasool	109

Lista de Tabelas

Tabela 1 -	Quantificação dos efeitos à saúde para poluentes atmosféricos selecionados – Exposição de curto prazo	24
Tabela 2 -	Limites nacionais de emissão de poluentes atmosféricos segundo as fases do Proconve – Veículos leves do ciclo Otto	25
Tabela 3 -	Estratégias para gerenciamento da qualidade do ar em grandes cidades no Brasil e em outros países.	26
Tabela 4 -	Benefícios à saúde pública devido às inspeções do Programa I/M em São Paulo no exercício de 2011.	31
Tabela 5 -	Redução nas emissões totais de CO dos automóveis em 2011-São Paulo	38
Tabela 6 -	Valores de precisão nas medições feitas com RSD4600 – $\text{CO}_2 > 20\%$	51
Tabela 7 -	Valores de precisão nas medições feitas com RSD4600 – $\text{CO}_2 \leq 20\%$	51
Tabela 8 -	Relação de alguns estudos e projetos que utilizaram RSD	59
Tabela 9 -	Filtros de dados aplicados em programas regulares de SR nos EUA	64
Tabela 10 -	Distribuição da frota de veículos leves pesquisada segundo o combustível	68
Tabela 11 -	Distribuição da frota pesquisada segundo a Fase do Proconve	69
Tabela 12 -	Distribuição da frota pesquisada segundo o fabricante do veículo	69
Tabela 13 -	Distribuição da frota pesquisada segundo as faixas de VSP	70
Tabela 14 -	Resultados do ajuste para o modelo do $\ln(\text{CO}/\text{CO}_2)$	80
Tabela 15 -	Resultados do ajuste para o modelo do $\ln(\text{HC}/\text{CO}_2)$	81
Tabela 16 -	Resultados do ajuste para o modelo do $\ln(\text{NO}/\text{CO}_2)$	83
Tabela 17 -	Distribuição da frota de veículos leves ciclo Otto inspecionada no Programa I/M exercício de 2010 segundo o combustível	84
Tabela 18 -	Parâmetros estimados das distribuições Gaussianas ajustadas para os índices de poluentes – dados transformados ($\ln$)	87
Tabela 19 -	Valores limite do índice do poluente para identificação de veículos com elevada emissão segundo a fase do Proconve	88
Tabela 20 -	Cronologia da mistura carburante automotiva no Brasil	98

Siglas utilizadas

ADB -	<i>Asian Development Bank</i>
AEP -	<i>Asic Environmental Partnership</i>
AIC -	<i>Akaike's Information Criterion</i>
ARC -	<i>Auckland Regional Council</i>
CETESB –	Companhia Ambiental do Estado de São Paulo
CO -	Monóxido de Carbono
CO ₂ -	Dióxido de Carbono
CO _c -	Concentração de CO corrigida pelo fator de diluição
COMEAP -	<i>Committee on the Medical Effects of Air Pollutants</i>
CONAMA –	Conselho Nacional do Meio Ambiente
CONRE -	Conselho Regional de Estatística
CPLA -	Coordenadoria de Planejamento Ambiental
CRC -	<i>Coordinating Research Council, Inc.</i>
CSV -	Formato de arquivo de dados apenas separados por vírgulas
DETRAN-SP-	Departamento Estadual de Trânsito de São Paulo
E0 -	Veículos Pré <i>Euro Class</i> fabricados antes de Jul/1992
E1 -	<i>Euro class 1</i> - Veículos fabricados de Jul/1992 a Dez/1995
E2 -	<i>Euro class 2</i> - Veículos fabricados de Jan/1996 a Dez/1999
E3 -	<i>Euro class 3</i> - Veículos fabricados de Jan/2000 a Dez/2004
E4 -	<i>Euro class 4</i> - Veículos fabricados de Jan/2005 a Ago/2009
E5 -	<i>Euro class 5</i> - Veículos fabricados de Set/2009 a Ago/2014
E6 -	<i>Euro class 6</i> - Veículos fabricados a partir de Set/2014
EI -	<i>Emission Index</i>
EU -	<i>European Union</i>
EUA -	Estados Unidos da América
ESP -	<i>Environmental System Products</i>
GM -	<i>General Motors</i>
GNV –	Gás Natural Veicular
GPS -	<i>Global Positioning System</i> (sistema de posicionamento global)
H ₂ O -	Água
HC -	Hidrocarbonetos não metano
HCC -	Concentração de HC corrigida pelo fator de diluição

IBAMA –	Instituto Brasileiro do Meio ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis
I/M -	Inspeção e Manutenção Veicular
IM240 -	Teste de referência adotado nos Estados Unidos para ensaio de veículos em dinamômetro num ciclo padrão avaliando as emissões
IME -	Instituto de Matemática e Estatística da USP
IPI -	Imposto sobre Produtos Industrializados
IR -	<i>Infrared</i> – Infra-vermelho
ISO -	<i>International Standard Organization</i>
L1 -	Fase 1 do Proconve para veículos Leves fabricados de 1989 a 1991
L2 -	Fase 2 do Proconve para veículos Leves fabricados de 1992 a 1996
L3 -	Fase 3 do Proconve para veículos Leves fabricados de 1997 a 2005
L4 -	Fase 4 do Proconve para veículos Leves fabricados de 2006 a 2008
L5 -	Fase 5 do Proconve para veículos Leves fabricados de 2009 em diante
LDV -	<i>Ligth Duty Vehicle</i> [veículos leves]
MAPA -	Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento.
MDB -	Formato de banco de dados do MS-Office
MIT –	<i>Massachusetts Institute of Technology</i>
MP ₁₀ -	Material Particulado Inalável (diâmetro equivalente < 10µm)
MP _{2,5} –	Material Particulado - 2.5µm (diâmetro equivalente < 2,5µm)
MSP -	Município de São Paulo
MTBE -	<i>Methyl Tert - Butyl Ether</i> (C ₅ H ₁₂ O)
NDIR –	<i>Non Dispersive Infrared</i> (Infravermelho não dispersivo)
NG -	<i>Natural Gas</i> (Gás Natural)
NH ₃ -	Amônia
N ₂ O -	Óxido Nitroso
NO -	Óxido Nítrico
NO _x -	Óxidos de Nitrogênio (NO + NO ₂)
O ₃ -	Ozônio

OBD -	<i>On Board Diagnostic</i>
PCPV –	Plano de Controle da Poluição Veicular
PMSP -	Prefeitura do Município de São Paulo
PNC -	<i>Particle Number Concentration</i>
ppm -	Partes Por Milhão em massa (equivalente a mg/Kg)
Proálcool –	Programa Nacional do Álcool
Proconve –	Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores
R -	Linguagem de programação orientada a objetos empregada em análises estatísticas
RMSP -	Região Metropolitana de São Paulo
RSD -	<i>Remote Sensing Device</i> (equipamento de medição remota)
S ₁₀ -	óleo diesel com Teor de enxofre até 10 mg/Kg de combustível
S ₅₀ -	óleo diesel com Teor de enxofre até 50 mg/Kg de combustível
SEADE -	Fundação Sistema Estadual de Análise de Dados
SIMEA -	Simpósio Internacional de Engenharia Automotiva
SMA -	Secretaria de Estado do Meio Ambiente
SO _x -	Óxidos de Enxofre
SR -	Sensoriamento Remoto
SVMA -	Secretaria do Verde e do Meio Ambiente da Prefeitura de São Paulo
UAQM -	<i>Urban Air Quality Management</i>
USAID -	<i>United States Agency for International Development</i>
USEPA –	<i>US Environmental Protection Agency</i> (Agência de proteção ambiental dos EUA)
USP -	Universidade de São Paulo
UV -	Ultravioleta
US -	<i>United States</i>
VSP -	<i>Vehicle Specific Power</i> [potência instantânea por unidade de massa do veículo]
WHO -	<i>World Health Organization</i> (Organização Mundial da Saúde)
XLS -	Formato de planilha do aplicativo MS-Office

Estrutura da tese

Capítulo 1 – Introduz o leitor ao tema, com aspectos da poluição do ar, seus efeitos à saúde pública, importância da poluição do ar por veículos automotores, estratégias adotadas no Brasil e em outros países, limites nacionais de emissão para veículos do ciclo Otto, efeitos observados pelo Programa de I/M adotado por alguns anos na cidade de São Paulo, e alguns aspectos da legislação nacional de controle da poluição veicular;

Capítulo 2 – Apresenta os objetivos do trabalho, divididos em objetivo principal e objetivos específicos.

Capítulo 3 – Apresenta a metodologia, os processos de aquisição de dados, os métodos de coleta dos dados, apresenta a tecnologia de SR, o equipamento RSD 4600, a forma de avaliação das emissões veiculares, os requisitos necessários para medições válidas, os filtros de dados necessários e as aplicações para o RSD na identificação de veículos *High emitter* além das técnicas estatísticas empregadas;

Capítulo 4 – Apresenta os resultados dos modelos GAMLSS ajustados por poluente testando os fatores que precisam ser considerados para o estabelecimento dos valores indicativos de veículos HE. Apresenta a abordagem baseada no método EM para a determinação desses valores identificando as duas distribuições associadas aos veículos normais dos *High emitters* apresentado os resultados obtidos por poluente e fase do Proconve;

Capítulo 5 – Apresenta a discussão do comportamento dos valores médios de emissões dos poluentes, segundo as fases do Proconve; expõe a pesquisa de possíveis fatores que poderiam influenciar o comportamento diferenciado para as emissões de NO por parte dos veículos movidos exclusivamente a gasolina.

Capítulo 6 – Apresenta as conclusões e recomendações da tese.

1. INTRODUÇÃO

Um dos principais problemas que mais afetam as áreas urbanas é a poluição do ar, não sendo restrito aos países em desenvolvimento, afetando igualmente os países desenvolvidos. O crescimento populacional, adensado nas áreas urbanas, associado à ampliação da frota de veículos automotores nessas regiões, leva a sérios problemas de poluição do ar com reflexos na saúde na população exposta, principalmente crianças com até cinco anos de idade e idosos. Bales (2015) cita em seu trabalho estudos que associam a poluição ao ar à redução da função pulmonar, asma na população infantil, alterações na frequência cardíaca, baixo peso ao nascer, diabetes e câncer. Uma revisão sobre o tema, específica para a cidade de São Paulo pode ser encontrada em Toledo (2011).

Em 2013 a Organização Mundial da Saúde (WHO), através de seu escritório regional na Europa, publicou o relatório intitulado *Review of evidence on health aspects of air pollution Project (REVIHAAP)* no qual apresenta uma revisão bastante completa dos efeitos à saúde associados à poluição do ar. O relatório apresenta respostas para 24 questões relevantes para a definição de políticas na União Européia (EU) relativas ao gerenciamento da qualidade do ar. São questões relativas aos efeitos à saúde devido ao Material Particulado, ao Ozônio, ao NO₂ próximo às vias de tráfego (WHO, 2013).

Recente publicação da WHO apontou que ocorrem anualmente aproximadamente 600.000 mortes de crianças com até cinco anos, apontou ainda que mais de 50% das mortes por pneumonia são atribuídas à poluição do ar (WHO, 2017). A poluição do ar ainda é responsável pelo aumento do risco de infecções respiratórias, asma, condições neonatais adversas e anomalias congênitas. Pesquisas recentes indicam que a poluição do ar seja responsável por afetar o desenvolvimento cognitivo de crianças e induzem o desenvolvimento de doenças crônicas na idade adulta. (WHO, 2016a; WHO, 2016b; SLY, 2016). Embora fontes domésticas, comerciais e industriais também contribuam para a poluição do ar urbano, é conhecido que entre 70 e 80% da poluição do ar em nações em desenvolvimento são de origem veicular. Grande parte causada por veículos antigos, com manutenção deficitária, infra-estrutura de vias deficitárias e qualidade inferior dos combustíveis (GULIA, 2015).

Recentes estudos publicados pelo *Committee on the Medical Effects of Air Pollutants* (COMEAP), chegam a quantificar os agravos à saúde associados aos poluentes atmosféricos, Hitchcock et.al.(2014) apresentam um resumo deles. Na Tabela 1 é apresentado um extrato dos mesmos para os poluentes selecionados e respectivos efeitos devidos à exposição de curto prazo.

Tabela 1 – Quantificação dos efeitos à saúde para poluentes atmosféricos selecionados – Exposição de curto prazo.

Métrica	Impacto na saúde	Coeficiente
Estimativas dos coeficientes para exposição de curto prazo de MP₁₀	Mortes por todas as causas	0,75% para cada 10µg/m ³ a mais na média de 24h
	Internação hospitalar por problemas respiratórios	0,8% para cada 10µg/m ³ a mais na média de 24h
	Internação hospitalar por problemas cardiovasculares	0,8% para cada 10µg/m ³ a mais na média de 24h
Estimativa do coeficiente para exposição de curto prazo de NO₂	Internação hospitalar por problemas respiratórios	2,5% para cada 50µg/m ³ a mais na média de 24h
Estimativas dos coeficientes para exposição de curto prazo ao ozônio	Mortes por todas as causas	3,0% para cada 50µg/m ³ a mais na média de 8h
	Internação hospitalar por problemas respiratórios	3,5% a mais para cada 50µg/m ³ a mais na média de 8h

Source: HITCHCOCK et.al. (2014) apud COMEAP (2013)

Especificamente para o NO₂, o resumo das evidências foi:

- As evidências sugerem que as associações reportadas entre concentrações ambientais de NO₂ e efeitos à saúde são causais (EPA, 2015; REVIHAAP – WHO, 2013);
- Os efeitos causados pelo NO₂ são adicionais àqueles devido ao material particulado, principalmente ao MP₁₀;
- Estudos conduzidos na Europa (ESCAPE - *European Study of Cohorts for Air Pollution Effects*) apresentaram resultados coerentes com os observados nos EUA.

As principais estratégias adotadas em outras grandes cidades do mundo estão apresentadas na Tabela 3. Londres irá implementar a partir de 2019, *zonas de emissão ultra baixa* para reduzir os problemas devido ao material particulado e ao NO_x na cidade (C40,2017).

A maioria das estratégias de gerenciamento da qualidade do ar urbana no Brasil é devido ao Proconve ou por ele induzida. A Resolução CONAMA 18/1986 em seu primeiro artigo expõe os objetivos do referido programa. As reduções nas emissões de poluentes foram estabelecidas no Proconve através do estabelecimento de fases. Na Tabela 2 são apresentadas as fases e os respectivos limites fixados para os veículos leves.

Tabela 2 – Limites nacionais de emissão de poluentes atmosféricos segundo as fases do Proconve – Veículos leves do ciclo Otto

Fase PROCONVE / Resolução CONAMA	Período	CO (g/km)	HC (g/km)	NMH C (g/km)	NO _x (g/km)	RCHO (g/km) (1)	MP (g/km) (2)	Evap. (g/teste) (1)	CO-M.L. (%vol) (3)
L1 / 18/86	1989-1991	24,0	2,10	n.a.	2,0	n.a.	n.a.	6,0	3,0
L2 / 18/86	1992 - 1996	12,0	1,20	n.a.	1,4	0,15	n.a.	6,0	2,5
L3 / 15/95	1997-2004	2,0	0,30	n.a.	0,6	0,03	0,05	6,0	0,5
L3 / 315/02	mai/2003							2,0	
L4 / 315/02	2005 (40%)	2,0	0,30 (4)	0,16	0,25 (3) ou 0,60 (2)	0,03	0,05	2,0	0,5
	2006 (70%)								
	2007(100%)								
L5 / 315/02	2009 - 2013	2,0	0,30 (4)	0,05	0,12 (3) ou 0,25 (2)	0,02	0,05	2,0	0,5
L5 / 415/09	2012 (1)							1,5/2,0 (5)	
L6 / 415/09	2013 (2)	1,3	n.a.	0,05	0,08	n.a.	0,025	n.a.	n.a.
	2014 (6)		0,30 (4)			0,02	n.a.	1,5/2,0 (5)	0,2
	2015								

Notas:

n.a. = não se aplica

(1) apenas para veículos do ciclo Otto, exceto a GNV.

(2) apenas para veículos do ciclo diesel.

(3) para veículos do ciclo Otto.

(4) apenas para veículos a GNV.

(5) limites de 2,0 caso procedimento câmara de volume variável.

(6) apenas para os novos lançamentos de veículos do ciclo Otto.

Tabela 3 – Estratégias para gerenciamento da qualidade do ar em grandes cidades no Brasil e em outros países.

Estratégias para gerenciamento da qualidade do ar urbano	USA(a)	UK(b)	EU(c)	Australia (d)	British Columbia (e)	Japan (f)	Hongkong (g)	Singapura (h)	Mexico (i)	Tailandia (j)	Africa do Sul (k)	China (l)	India (m)	Brasil (n)
Veículos movidos a combustíveis alternativos	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	o	x	x	x
Melhoria da qualidade dos combustíveis	x	x	x	x	x	x	x	x	x	o	o	x	x	x
Emprego do conversor catalítico	x	x	x	x	x	x	x	x	x	o	o	o	o	x
Programa de Inspeção e Manutenção Veicular	x	x	x	x	x	x	x	x	x	o	o	o	o	o
Uso de veículos com emissão reduzida ou nula	x	x	x	x	x	x	x	o	x	o	o	o	o	n
Proibição de estacionamento na rua	x	x	x	x	x	x	x	x	x	o	o	o	o	n
Suporte para ciclismo	x	x	x	x	x	x	x	x	o	x	-	x	n	o
Pedágio em zonas congestionadas	x	x	x	x	-	-	-	-	x	n	n	n	n	n
Corredor específico para ônibus	x	x	x	x	x	x	o	o	x	o	o	o	o	o
Corredor específico para pedestres	x	x	x	x	x	x	o	o	x	o	o	o	o	n
Zona de baixa emissão	-	x	x	o	-	-	-	n	o	n	n	n	n	n
Proibição de entrada de veículos antigos em zonas de controle da qualidade do ar	x	x	x	x	x	x	x	x	x	o	o	o	o	n
Proibição total de veículos pesados em zonas de controle da qualidade do ar	x	x	x	x	x	x	x	x	x	o	o	o	o	n
Start-stop mandatório	x	x	x	o	x	-	o	-	-	-	n	-	n	n
Sistema de Controle Adaptativo do tráfego	o	x	x	-	-	-	n	n	-	n	n	n	n	n
Sistema de Transporte Inteligente	x	x	x	-	-	-	-	-	-	-	n	n	n	n
Proibição de veículos emitindo fumaça de circular	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	o	o	o	n
Exigência de OBD nos veículos	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	o	o	o	x
Redução de impostos para veículos com baixa emissão	x	x	x	-	x	x	-	-	x	n	n	n	n	n
Transporte de massa rápido e eficiente	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	o	x	x	o
Compartilhamento de veículo / Incentivo a caronas	x	x	x	x	x	-	-	x	-	o	n	n	n	o
Manutenção da infra-estrutura de rolamento	x	x	x	o	x	x	o	x	x	o	o	o	o	n
Normas rigorosas de emissão veicular	x	x	x	x	x	x	x	x	x	o	o	x	x	x
Redução da frota de veículos a diesel	x	x	x	x	x	x	x	x	x	o	n	n	n	n

x=Corretamente implantado; o= Parcialmente implantado; n=Não implantado; – Informação não disponível

a CULS(2014),U.S.EPA(2011a)

b Corporation of London (2003), Newcastle City Council (2006), Hitchcock et.al.(2014)

c EEA(2011b),EEA(2013b),EEA(2013c),EU Transport and Environment (2014),C40.org(2017)

d NSW Government(2009),Commonwealth of Australia(2011),EPA(2007),Todd et.al. (2011)

e B.C.Government (2008)

f CEC(2005),CEC(2011)

g Environmental Bureau, Hong Kong(2013), Edesess(2011)
 h ADB(2006a), NEA(2014)
 i Molina and Molina(2002), Davis(2008), Molina et.al.(2009), Molina et.al.(2010), Jazcilevich et.al.(2011), Salcedo et.al.(2012), Chavez Baeza and Sheinbaum Pardo (2014)
 j KEI(2002); IGES(2007), CAI Asia (2010b)
 k DEAT(2008), Naiker et.al.(2012)
 l Hao et.al.(2005), Zhou e.al.(2010), Wu et.al.(2011), Zhong et.al.(2013b)
 m CPCB(2006), CPCB(2010b)
 n Resoluções CONAMA 315/2002, CONAMA 354/2004 e CONAMA 282/2001, ANP, Bales (2015).
<http://www.vamofortaleza.com/> , <http://ww2.mobilicidade.com.br/portoleve/carroleve/home.aspx> ,
<http://www.rio.rj.gov.br/web/secpar/carro-eletrico>

Fonte: GULIA et al. (2012) adaptado por Bruni AC.

O problema de poluição do ar na Região Metropolitana de São Paulo (RMSP) tem como uma de suas principais fontes os veículos automotores leves do ciclo Otto. Em 2012 eles foram responsáveis por 71% das emissões de monóxido de carbono (94.000 t/ano) e 65,4% dos hidrocarbonetos não metano (27.240 t/ano), conforme reportado pela Cia. Ambiental do Estado de São Paulo. (CETESB, 2013a)

Na Figura 1 é apresentado o gráfico com as contribuições relativas de cada tipo de fonte, por poluente regulamentado. Além das contribuições dos veículos leves, ela aponta os veículos pesados movidos a óleo *diesel* como os principais emissores dos óxidos de nitrogênio (60,9%) e de material particulado (35,3%). Os processos industriais respondem por 52,3% do total dos óxidos de enxofre e constituem a principal fonte deste poluente na RMSP.

Figura 1 – Emissões relativas (%), por tipo de fonte de poluição do ar e poluente na RMSP em 2012

Fonte: CETESB (2013a)

Um dos fatores que agravam o problema é o estado de manutenção dos veículos, o que é acentuado pela idade da frota circulante e pelos congestionamentos que reduzem a velocidade média de percurso. Em 2013 a média etária dos automóveis no Estado de São Paulo foi de 9 anos. Na cidade de São Paulo a média etária em 2010 dos veículos inspecionados foi de 6,8 anos. As perspectivas são de crescimento do número de veículos em circulação, em 2013 a frota do Estado de São Paulo foi estimada em 14,8 milhões de veículos, sendo 11,3 milhões de automóveis, 1,85 milhões de veículos comerciais leves, 541 mil ônibus/micro-ônibus e caminhões, e 2,6 milhões de motocicletas e similares. O crescimento em relação a 2013 foi de 3,2% e a média etária geral foi de oito anos. Entretanto, mais de 4,4 milhões de veículos possuíam mais de 10 anos de idade e ainda circulam no Estado (CETESB, 2013a), estes veículos possuem fatores de emissão muito superiores aos dos veículos novos e, não raro, seu estado de conservação e manutenção não é adequado.

O equacionamento desse problema, visando reduzir as emissões, teve como peça fundamental a criação do Plano de Controle de Poluição Veicular (PCPV). A Resolução CONAMA 418/2009, alterada pela Resolução CONAMA 426/2010, previa a elaboração, até 30/06/2011, do “Plano de Controle de Poluição Veicular – PCPV”

pelos órgãos ambientais estaduais ou, complementarmente, órgãos municipais ou consórcios destes. O PCPV permite o estabelecimento de políticas públicas que efetivamente melhorem ou minimamente mantenham a qualidade do ar em aglomerações urbanas, impactadas pelo crescimento da frota de veículos automotores derivado do adensamento populacional (falta de planejamento urbano), da melhoria do poder de compra do cidadão, da disponibilidade de crédito a prazo e dos incentivos do governo federal para a indústria automobilística (redução da alíquota do IPI).

Em termos de saúde, as parcelas da população mais suscetíveis aos efeitos da poluição do ar são as crianças (até 5 anos) e os idosos (acima de 60 anos). Em 2013, a SEADE apresentou as projeções para a população da Cidade de São Paulo até 2050 (SEADE, 2013) e a parcela de idosos deve crescer consideravelmente, passando dos 13% atuais para 30% em 2050, conforme exposto na Figura 2. Esse fato ampliará uma parcela da população que é mais suscetível aos problemas decorrentes da poluição do ar.

Figura 2 – Pirâmide etária da população projetada para o Município de São Paulo em 2050 segundo o sexo

Fonte: SEADE (2013)

A população acima de 60 anos crescerá dos atuais 1,471 milhões de pessoas (2013), para 3,634 milhões na metade do século (2050).

Todos os esforços para a redução das emissões veiculares devem então ser intensificados, pois toda redução conseguida, terá como contrapartida a diminuição do número de internações e de óbitos conforme estudos da Faculdade de Medicina da USP (CANÇADO et.al., 2006; BRAGA et.al., 2001; MARTINS et. al., 2002; BRAGA et.al., 1999).

O Programa de Inspeção e Manutenção da Cidade de São Paulo – IM-SP já teve avaliado seu impacto em termos de Saúde Pública. Na Tabela 4 é apresentado o resultado obtido no exercício de 2011, transcrito de trabalho apresentado no XX Simpósio Internacional de Engenharia Automotiva – SIMEA, ocorrido em setembro de 2012. (BRANCO et.al., 2012a). As mortes e internações apontadas são aquelas evitadas com a redução das concentrações de $MP_{2.5}$.

Tabela 4 – Benefícios à saúde pública devido às inspeções do Programa I/M em São Paulo no exercício de 2011.

CENÁRIO DE CONTRIBUIÇÃO	Redução MP _{2.5} µg/m³	IMPACTO (número/ano)				Economia Total (milhares de US\$)	
		Mortes evitadas		Internações evitadas			
		MSP	RMSP	MSP	RMSP		
Apenas a frota inspecionada (75% da frota circulante)	1,18	379	584	894	1515	51360	79499
Frota circulante no MSP	1,57	504	778	1190	2016	68300	105904
Frota circulante na RMSP	3,15	1011	1560	2388	1045	137007	212357

Fonte: De André (2012) apud Branco et. al. (2012).

O problema da poluição gerada pelos veículos é grande em magnitude e com tendência a agravar-se; a frota continua crescendo, a velocidade média nas grandes cidades se reduz cada vez mais devido aos congestionamentos, gerando mais poluição (MEHEL, 2015) e aumentando o consumo de combustível, temos ainda que o país enfrenta severa crise econômica desde 2014, fato que coloca em segundo plano a manutenção preventiva dos veículos, principalmente agora sem o funcionamento do Programa I/M em São Paulo, suspenso em 2014. A malha de transporte metroviário é pequena para o porte da cidade. Tudo isso aponta para a necessidade de buscar uma solução holística envolvendo todos os atores.

Foi reproduzida a Figura 3 da breve comunicação feita por Mehel & Murzyn (2015) na qual apresentam os resultados obtidos em túnel de vento, variando a velocidade do ar e avaliando a dispersão de nanopartículas. Ela ilustra a distribuição espacial das concentrações das partículas emitidas pelo cano de escapamento de um veículo automotor em duas velocidades: 30Km/h e 50Km/h.

Figura 3 – Concentrações de Nanopartículas (PNC) medidas em duas condições de velocidade em túnel de vento.

Fonte: MEHEL (2015)

Negrisoni (2013), em estudo realizado no período de 2007 e 2008 na cidade de Sorocaba identificou aumento significativo do risco relativo para exposição de curto prazo ao NO_2 e internações de crianças com pneumonia; o valor observado para o Risco Relativo (RR) foi de **1,016** (1,007–1,025) para o mesmo dia da exposição do NO_2 . Identificou ainda Risco Relativo associado à exposição de curto prazo (4 dias anteriores) ao PM_{10} e internação por pneumonia, neste caso o RR foi de **1,009** (1,002–1,016).

Na Figura 4 é apresentada a evolução das taxas de internações por pneumonia na Cidade de São Paulo no período de 1999 a 2007 para as faixas etárias mais suscetíveis à poluição atmosférica. Ela aponta as crianças de 1 a 4 anos como o

grupo mais suscetível aos efeitos da poluição atmosférica. O grupo de idosos com idade entre 70 e 79 anos tem comportamento próximo ao de crianças na faixa etária de 1 a 4 anos de idade, que é o mais crítico, com as maiores taxas de internações. Os grupos etários de crianças entre 5 e 9 anos e o de idosos entre 60 e 69 anos tiveram comportamento das internações praticamente coincidentes. Vale realçar que a poluição do ar não é a única causa de pneumonia.

Figura 4 – Taxas de Internações por Pneumonia na Cidade de São Paulo segundo as faixas etárias mais suscetíveis (Internações/10000)

Fonte: Elaborado pelo autor com dados do Ministério da Saúde - DATASUS

Na Figura 5 é apresentada uma visão holística dos elementos necessários para a condução de uma estratégia de controle da poluição do ar oriunda dos veículos automotores.

Figura 5 – Elementos de uma estratégia de controle da poluição veicular visando promover a saúde

Fonte: Adaptado pelo autor a partir de ADB (2003).

Relativo aos padrões de emissão e avanços tecnológicos induzidos por eles, foi criado o Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores – *Proconve*, através da Resolução CONAMA 18/1986, a qual estabeleceu os procedimentos e os padrões de emissão que induziram a criação de novas tecnologias. De maneira indireta, também induziu a melhoria dos combustíveis, pois várias tecnologias adotadas, como o emprego de catalisador, assim o exigiram. Em 2013 começaram a ser comercializados em São Paulo o *diesel* S₁₀ (com até 10 mg/kg de enxofre) e a gasolina S₅₀ (com até 50 mg/kg de enxofre) que certamente trarão efeitos positivos na redução das emissões (SÁ et.al, 2012). Mas o conceito de *combustíveis mais limpos* inclui aqueles não produzidos a partir do petróleo - como o etanol - e eficiência energética, englobando então os veículos híbridos e os elétricos que possuem melhor eficiência energética (HERBER, 2012).

O Proconve, desde a sua criação, já previa a criação de Programas de I/M, com periodicidade anual (Art. 16º da Resolução CONAMA 418/2009), para assegurar que os ganhos tecnológicos implantados nos automóveis fossem preservados pelos usuários, de tal forma a manter a conformidade com as especificações originais do

fabricante. A Resolução CONAMA 07/93 estabeleceu oficialmente a figura do Programa de I/M.

Através da Resolução CONAMA 418/2009, foram incluídos no Proconve os motocicletos e similares que não faziam parte do escopo original do programa, época em que tinham pequena participação na frota e nas emissões.

O Programa I/M também possibilita a verificação da conformidade do projeto do veículo quanto à degradação pelo uso. No Estado de São Paulo, somente a Cidade de São Paulo possuía esse tipo de programa. Ele começou a operar somente em 2008, de maneira gradativa, e vinha apresentando significativos ganhos de redução dos poluentes (BRANCO, 2012b). Em 2014 esse programa foi suspenso pela PMSP.

No tocante ao planejamento dos transportes e gerenciamento de demandas, o *Plano Paulista de Energia 2020* estabeleceu diretrizes importantes que precisam ser levadas a cabo, são elas (*sic*):

- 90% dos veículos Otto novos flex rodando 90% do tempo com etanol;
- Manutenção do percentual de etanol anidro na gasolina C;
- Adoção do B10 (adição de 10% de biodiesel ao diesel tradicional);
- Frota de ônibus de transporte público na capital e regiões metropolitanas operando com biodiesel;
- Expansão dos transportes sobre trilhos na região metropolitana conforme planejamento da Secretaria de Transportes Metropolitanos;
- Implantação do Plano Diretor de Desenvolvimento dos Transportes com mudança na estrutura de participação dos modais (hidrovia de 0,5% para 5%; ferrovia de 8,1% para 20%; dutovia de 1,6% para 5%);
- Planejamento e gestão dos transportes reduzindo viagens vazias de 46% para 36%.

Claramente algumas delas fogem da alçada do Estado e por esse motivo serão difíceis de cumprir, outras trarão resultados mas a longo prazo.

Ações que tragam resultados mais imediatos e que tenham custos reduzidos serão sempre bem vindas e são absolutamente necessárias.

Para propor ações desse tipo, o conhecimento da frota é imperativo, assim como

fazer uso das tecnologias disponíveis. Na Figura 6 é apresentada a composição da frota de veículos automotores do ciclo Otto, inspecionada no exercício de 2011 na Cidade de São Paulo através do Programa I/M. A partir dela se constata que os veículos mais antigos são os que apresentam maior percentual de reprovações e rejeições devido à falta de manutenção. Como esses veículos possuem fatores de emissão muito superiores aos estabelecidos para os modelos mais novos (fases L4 e L5), apesar de serem em pequeno número, geram emissões significativas, principalmente se não adequadamente mantidos e regulados. Na Tabela 5 são apresentados os percentuais de redução no total das emissões, por ano de fabricação. O ganho na identificação desses veículos altamente poluidores e a exigência, a qualquer tempo, da sua manutenção por parte do proprietário, complementam a eficiência do Programa I/M que avalia os veículos periodicamente.

Figura 6 – Resultados das inspeções dos automóveis leves em 2011 por combustível

Fonte: BRANCO (2012c)

A partir da Figura 6 observa-se que os veículos a gasolina mais antigos, quase todos os veículos e álcool e todos os convertidos para GNV são os que apresentam os maiores índices de reprovação nas inspeções. Os veículos Flex se apresentam como aqueles com melhor percentual de aprovações, considerando aqui a mesma base comparativa: 2002 em diante. Os movidos a gasolina ficaram muito próximos a eles.

Na Tabela 5 são apresentados os percentuais de redução nas emissões de CO, por ano-fabricação dos veículos, conseguidos pelo programa. Ela aponta para os grupos de veículos mais problemáticos que, mesmo sendo em pequeno número, possuem potencial poluidor muito superior aos veículos mais recentes das fases L4 e L5 do Proconve.

Caso haja necessidade de priorização, ela aponta para os anos de fabricação dos veículos com maiores impactos nas emissões.

Tabela 5 – Redução nas emissões totais de CO dos automóveis em 2011-São Paulo

PROCONVE	ano de fabricação	Gasolina	Flex	Álcool	GNV-Gás	Total por ano de fabricação
PRÉ	até 1979	2,15%	0,00%	0,01%	0,03%	2,19%
	1980- 1988	3,40%	0,00%	4,13%	0,15%	7,67%
L1	1989	1,45%	0,00%	0,92%	0,06%	2,43%
	1990	2,87%	0,00%	0,22%	0,09%	3,19%
	1991	2,55%	0,00%	0,37%	0,09%	3,02%
	1992	1,33%	0,00%	0,26%	0,04%	1,63%
L2	1993	2,28%	0,00%	0,52%	0,11%	2,91%
	1994	3,22%	0,00%	0,37%	0,11%	3,70%
	1995	3,57%	0,00%	0,13%	0,15%	3,86%
	1996	3,17%	0,00%	0,03%	0,15%	3,35%
L3	1997	1,62%	0,00%	0,00%	0,11%	1,74%
	1998	0,83%	0,00%	0,00%	0,13%	0,96%
	1999	0,60%	0,00%	0,01%	0,08%	0,69%
	2000	0,67%	0,00%	0,01%	0,11%	0,78%
L4	2001	0,40%	0,00%	0,01%	0,06%	0,47%
	2002	0,30%	0,00%	0,02%	0,05%	0,37%
	2003	0,48%	0,03%	0,02%	0,04%	0,57%
	2004	0,40%	0,32%	0,01%	0,03%	0,76%
L5	2005	0,21%	0,66%	0,01%	0,04%	0,92%
	2006	0,08%	1,41%	0,00%	0,07%	1,55%
	2007	0,05%	1,61%	0,00%	0,09%	1,75%
Benefício relativo da categoria	2008	0,03%	1,83%	0,00%	0,09%	1,96%
	2009	0,01%	1,63%	0,00%	0,02%	1,66%
	2010	0,01%	0,69%	0,00%	0,02%	0,72%
		31,68%	8,18%	7,06%	1,92%	48,84%

Fonte: BRANCO (2012c)

Esse comportamento da frota de automóveis para o monóxido de carbono se repete para as emissões de hidrocarbonetos e, portanto, definem as categorias prioritárias para intervenção (projetos de renovação de frota para retirada dos mais poluentes, projetos que restrinjam a circulação em áreas centrais) e acompanhamento (fiscalização das emissões): são os veículos mais antigos a gasolina pertencentes às fases L1, L2 e Pré-Proconve, todos os convertidos a GNV, embora sejam em número reduzido e todos os movidos exclusivamente a álcool.

Considerando que o Decreto Municipal No. 53.989 de 13/06/2013 em seu Art. 8º alterou a periodicidade das inspeções conforme a seguir descrito, para os veículos leves do ciclo Otto:

- ficam isentos de inspeção pelos 3 primeiros anos;
- a partir do quarto, a cada 2 anos até 10 anos;
- anual a partir do 10º ano do licenciamento inicial.

Uma grande parcela dos veículos leves ciclo Otto deixará de ser inspecionada: nos 3 primeiros anos do licenciamento inicial e os veículos de 4 a 10 anos farão inspeção somente a cada 2 anos, inspeção anual somente após 10 anos.

Embora o Decreto 53.989 tenha sido aprovado, ele conflita com a Resolução CONAMA 419/2009 que estabeleceu periodicidade mínima anual para a inspeção veicular ambiental.

Os percentuais de reprovação/rejeição dos veículos com essas idades não são nulos, na verdade, para as frotas movidas a gasolina e os flex ele varia de 15 a 20% para veículos de 6 a 8 anos, conforme exposto na Figura 6.

Neste contexto, para acompanhar as emissões dos veículos em uso e monitorá-los durante os períodos onde foram desobrigados de efetuar inspeções, é que a tecnologia de sensoriamento remoto está inserida. Ela faculta efetuar medições de poluentes nas condições de uso (o veículo é avaliado nas vias de tráfego e, portanto, com carga) e fornece indicativos da necessidade de manutenção/correção, são os chamados veículos grandes emissores [*high-emitters*].

Para compreendermos o funcionamento dessa tecnologia, são apresentados seus fundamentos e os avanços conseguidos que levaram a mesma a ser considerada hoje como consolidada.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo Principal

- Definir critérios baseados em medições com sensoriamento remoto para identificação de veículos automotores leves do ciclo Otto com elevadas emissões de monóxido de carbono, hidrocarbonetos ou óxido nítrico.

2.2 Objetivos Específicos

- Avaliar se a potência específica do veículo, quando da medição pelo RSD, influenciou significativamente as emissões dos poluentes CO, HC e NO;
- Avaliar se a fase do Proconve e o tipo de combustível interferem significativamente nas emissões dos poluentes CO, HC e NO;
- Avaliar se há diferença significativa das emissões dos veículos a gasool em relação aos veículos flex;
- obter valores de CO, HC e NO a serem adotados como valores limites para medições com o sensoriamento remoto, para as fases do Proconve com maior relevância em termos de percentual na frota, a partir dos quais o veículo será considerado com emissão elevada – *high emitter*;
- apontar usos potenciais para a tecnologia de sensoriamento remoto na emissão dos poluentes veiculares;
- apresentar as condições ótimas para o seu emprego visando a identificação dos veículos com elevada emissão de poluentes.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Metodologia

Do ponto de vista metodológico a pesquisa é Aplicada, Quantitativa, Explicativa e Documental, conforme proposta de classificação de Antonio Carlos Gil (GIL, 1994).

Foram utilizados dados secundários obtidos pela *Remote Sensing do Brasil* no período de 14/11/2007 a 25/02/2010 em 36 locais na cidade de São Paulo com um total de 1.956.083 medições (mapa com a localização dos pontos no Anexo C) e os dados obtidos pela Controlar S/A (empresa contratada pela Secretaria do Verde e do Meio Ambiente da Prefeitura do Município de São Paulo), relativos às inspeções veiculares no exercício de 2009, quando foram inspecionados somente os veículos fabricados de 2003 a 2008 (veículos do ano eram isentos da inspeção pela legislação vigente à época) num total de 1.185.869 e do exercício de 2010, quando toda a frota foi inspecionada (exceto os fabricados em 2010), tendo neste exercício 2.514.111 inspeções. Os ofícios solicitando os dados do Programa de Inspeção e Manutenção da Cidade de São Paulo e dados de SR estão no Anexo A.

Os dados de qualidade do ar empregados na discussão dos resultados foram obtidos no sítio da CETESB através do Sistema Qualar. (CETESB, 2016).

Quanto ao objetivo da pesquisa, se enquadra como *explicativa*, pois buscou os fatores determinantes para a identificação de veículos com emissões excessivas de poluentes atmosféricos e, com base nos dados observados, determinou os valores indicativos de veículos com elevadas emissões dos poluentes CO, HC e NO.

A revisão bibliográfica e documental foi sobre o tema: *Sensoriamento remoto para medir emissão de poluentes emitidos através do cano de escape dos veículos automotores leves do ciclo Otto*.

O emprego da tecnologia de sensoriamento remoto para medições de gases emitidos pelos canos de escape dos veículos está bastante maduro; essa tecnologia data do início da década de 1980 e conta com diversas aplicações para diversos propósitos. Fez-se então necessário definir contornos para direcionar a pesquisa dos artigos publicados que seriam de interesse aos objetivos do presente trabalho. As questões que foram utilizadas para compor as *strings* [palavras chave] para a

pesquisa dos artigos foram: Local, Ano, Número de veículos amostrados e a finalidade do estudo. As finalidades de interesse foram: Identificação de *High emitters*, *High emitter index* [Índice dos high emitters], *Clean Screening* [identificar veículos com baixa emissão]; Avaliar programas e projetos na área veicular tais como verificação do emprego do *OBD* em programas de I/M; Estimar a emissão da frota circulante; Estimar o efeito da introdução de aditivos na gasolina como o *MTBE*; identificar veículos com emissão de fumaça em excesso [*smog check*]

Essa revisão sistematizada não foi elaborada tendo por objetivo uma Metanálise de dados utilizando ferramental estatístico apropriado para esse tipo de estudo nos moldes propostos por Chalmers (1990). A frota de veículos brasileira é singular, não teríamos estudos comparáveis em outros locais do mundo.

Estudos com medições dos gases de escape efetuadas com o equipamento *Portable Emission Measurement System* (PEMS) foram retirados da revisão por não usarem o RSD e por restrições óbvias avaliam apenas um pequeno número de veículos enquanto para nosso objetivo um grande número de veículos é necessário para a identificação dos veículos *high emitters* no conjunto da frota.

Foram consultados ainda relatórios técnicos de referência da WHO (2016, 2017).

3.2 Processos de aquisição de dados

3.2.1 Sensoriamento remoto

A ***Remote Sensing do Brasil – RSdB*** avaliou veículos da frota de São Paulo nos anos de 2008 a 2010. O levantamento foi realizado na Cidade de São Paulo tendo como Universo a frota de automóveis e utilitários leves do ciclo Otto. Os objetivos do levantamento foram determinar o perfil da frota por combustível e fase do Proconve, estimar a proporção de veículos que deixaram de fazer a inspeção estimando a taxa de evasão ao Programa I/M (situação irregular do veículo) e correlacionar às medições feitas através do SR com aquelas efetuadas nas inspeções (BRANCO et.al. 2012d)

A amostragem foi feita estratificando pelas regiões da Cidade, devido aos diferentes perfis da frota em cada região, reflexo do poder aquisitivo e do comércio local. No

Anexo C é apresentado o mapa com a distribuição dos pontos de amostragem.

As variáveis registradas no equipamento RSD4600 foram: Data, hora, Local, inclinação da via, velocidade, aceleração, Elco, ElHc, ElNo, % CO₂, placa do veículo, umidade, temperatura e outras variáveis de controle de qualidade do dado (indicadores de validação das medidas de cada sensor).

Onde **EI** são os índices de emissão definidos como:

$$\text{Elco} = \text{CO} / \text{CO}_2, \quad \text{ElHc} = \text{HC} / \text{CO}_2, \quad \text{ElNo} = \text{NO} / \text{CO}_2.$$

3.2.2 Programa I/M de São Paulo

O Programa de Inspeção e Manutenção da Cidade de São Paulo, em atendimento à LEI Nº 14.717, de 17 de abril de 2008, iniciou a fase de inspeção dos veículos em 2008 quando foram inspecionados somente os veículos movidos a diesel. No exercício de 2009 os veículos leves do ciclo Otto fabricados de 2003 a 2008 foram incluídos nas inspeções. No exercício de 2010 todos os veículos da frota licenciada da Cidade de São Paulo ficaram obrigados a efetuar a inspeção ambiental. Devido a essas fases de implantação, foram utilizados os dados obtidos nos exercícios de 2009 e 2010 para identificação dos veículos medidos através do SR.

3.2.2.1 Inspeções não computadorizadas

Os *Critérios de Rejeição* dos veículos, o Procedimento de *Pré-inspeção Visual* e o procedimento de *Inspeção Visual* foram estabelecidos pelos procedimentos apresentados no ANEXO III - PROCEDIMENTO DE INSPEÇÃO DE VEÍCULOS DO CICLO OTTO, EXCETO MOTOCICLOS E ASSEMELHADOS, NO PROGRAMA I/M-SP da Portaria 009/2013/SVMA (SVMA, 2013).

3.2.2.2 Inspeção Computadorizada

Nesta etapa são medidos os níveis de CO, CO₂, HC e o fator de diluição, para em seguida, comparar com os limites que aprovam o veículo, estabelecidos na Portaria 009/2013/SVMA.

Nos veículos convertidos para GNV, os testes são feitos com o GNV e com combustível líquido (gasolina e/ou etanol). Os veículos Flex são ensaiados com o combustível que estiver no tanque do veículo, independentemente da mistura.

Informações completas sobre os procedimentos foram publicadas nos anexos da Portaria 009/2013/SVMA divulgada no Diário Oficial do Município do dia 29/01/2013, em seu Art. 9º: *“Os veículos do ciclo Otto deverão ser inspecionados de acordo com a metodologia e limites estabelecidos nos Anexos II e IV desta Portaria, no que diz respeito a emissões de gases e ao Anexo VI no que diz respeito a ruído”*.

Os dados das inspeções realizadas no Programa I/M da Cidade de São Paulo que foram analisados são referentes aos exercícios de 2009 e 2010, de todos os automóveis e utilitários leves do ciclo Otto. Em 2010 são dados censitários de toda a população, pois a inspeção era obrigatória e condicionava o licenciamento à aprovação do veículo nos testes de emissão.

As variáveis registradas foram: data, hora, placa, ano-fabricação, ano-modelo, combustível, tipo de veículo, fator de diluição (para correção das concentrações de CO e HC), COc(%), HCc(ppm), CO₂(%), resultado da inspeção, relação de motivos de rejeição, relação de itens de reprovação. Esses registros alimentaram o banco de dados que foi especialmente criado para trabalhar com esse volume de dados, garantindo a sua segurança e confiabilidade. O Sistema Gerenciador de Banco de Dados (SGBD) adotado foi o *PostgreSQL*.

3.3 Métodos de coleta dos dados

Os dados provenientes do sensoriamento remoto foram obtidos empregando a técnica apresentada no item 3.5, com detalhamento do procedimento de medição no item 3.7 e apresentação do equipamento RSD4600 no item 3.6.

Os dados do Programa I/M foram obtidos através de procedimentos normatizados apresentados no item 3.2.2 e seus subitens.

3.4 Análises Quantitativas dos dados

3.4.1 Preparação das Bases de dados

Foram utilizadas três bases de dados para a finalidade do projeto:

- 1- Base de dados com as medições através do equipamento **RSD4600**;
- 2- Base de dados com todas as inspeções de veículos ciclo Otto contendo os dados das inspeções realizadas no exercício de **2009** pelos automóveis e utilitários;
- 3- Base de dados com todas as inspeções de veículos ciclo Otto contendo os dados das inspeções realizadas no exercício de **2010** pelos automóveis e utilitários.

Para facilitar a importação desses dados para o PostgreSQL, todos foram disponibilizados pelas empresas em formatos **CSV**, **MDB** ou **XLS**.

Esses dados foram então convertidos para o formato CSV, mantidas as três bases de dados em separado, por aplicativos especialmente desenvolvidos para essa finalidade. Após a conversão eles foram importados pelo PostgreSQL em um único banco de dados. Neste banco de dados foi criada uma Tabela com os dados cruzados do SR com os do Programa I/M, a chave de pareamento foi a placa do veículo. As três tabelas ficaram então disponíveis para consultas visando selecionar os dados para as análises estatísticas. Os dados da primeira inspeção foram empregados no pareamento com os dados do SR.

Esse banco de dados ficou hospedado em um servidor com sistema operacional *Debian 7* para arquitetura Intel 64 bits com processador de 4 núcleos. A versão do SGBD foi a *PostgreSQL 9.0*.

A ferramenta empregada para fazer as consultas e demais atividades de banco de dados foi a *pgAdmin versão 1.12.1*.

3.4.2 Análises estatísticas

As etapas de análise estatística dos dados foram:

- Controle de qualidade dos dados: aplicação dos filtros de dados e tratamento dos valores negativos;
- Análise descritiva dos parâmetros de interesse: distribuição da velocidade, da aceleração, da VSP – Potência Específica do Veículo [potência instantânea por unidade de massa do veículo];

- Análise descritiva dos poluentes de interesse CO, HC e NO: médias, medianas, desvio padrão, amplitude de variação;
- Transformação dos dados: foi empregada a transformação logarítmica na base neperiana ou natural aos dados de índices dos poluentes CO, HC e NO;
- Análise descritiva dos dados de Umidade relativa do ar e da temperatura na via no instante da medição;
- Elaborados diagramas do tipo *Boxplot* para visualização do comportamento das emissões dos poluentes segundo o Ano-Modelo do veículo;
- Elaborados diagramas do tipo *Boxplot* para visualização do comportamento das emissões dos poluentes segundo as Fases do Proconve;
- Elaborados diagramas do tipo *Boxplot* para visualização do comportamento das emissões dos poluentes segundo as Faixas de VSP e tipo de Combustível;
- Elaborados diagramas do tipo *Boxplot* para visualização do comportamento das emissões dos poluentes segundo as Fases do Proconve e tipo de Combustível;
- Determinação de quais distribuições seguem os dados de emissão de poluentes medidos através dos índices de poluição; Uma vez identificadas as distribuições, foram ajustados modelos, para tanto, incluiu-se os seguintes fatores: Faixas de VSP, Combustível e Fases do Proconve;
- Ajustados *Modelos Lineares*, usando a classe de modelos *GAMLSS* para avaliação da influência das fases do Proconve, tipo de combustível e Faixas de VSP sobre as medidas de CO, HC e NO, o que ofereceu suporte para os critérios a serem definidos;
- Aplicação do método iterativo EM para identificação das duas distribuições que se misturam (uma associada aos veículos *normais* e outra aos *anormais*), possibilitando a estimação dos seus parâmetros e da distribuição da *variável latente* indicativa de qual distribuição o veículo pertence. Isso foi feito por fase do Proconve e combustível;
- Estabelecimento dos valores de corte [*cutoff*] para indicação dos veículos altamente poluidores [*high emitters*], para CO, HC e NO segundo os fatores significativos obtidos via ajuste de modelos. O percentil 98% da distribuição dos veículos com emissões *normais* foi adotado.

As análises estatísticas foram feitas com emprego do *software R*, por profissional capacitado e credenciado junto ao Conselho Regional de Estatística (CONRE).

Os pacotes utilizados para nas análises estatísticas e na elaboração dos gráficos foram: ggplot2, plyr, hexbin, gcookbook, RColorBrewer, scales, amap, RGtk2, colorspace, mclust, flexmix, lattice, fpc, gamlss, gamlss.add, openair, hexbin, scatterplot3d, grid, sm, vioplot, beanplot, Oldata, mixtools, reshape2, Rcpp, devtools, sinkr, fitDist, lme4, biglm, ffbase, LaF, ETLUtils, mosaic, lazyeval, tigerstats.

3.5 Apresentação da tecnologia de Sensoriamento Remoto

3.5.1 O princípio físico da medição

O princípio no qual se baseia o *RSD4600* e o sensoriamento remoto de maneira geral é o da espectroscopia, cuja base física se fundamenta na *Lei de Beer-Lampard*.

Conforme Jiménez-Palacios (1999), essa lei postula que a intensidade de um feixe de luz é proporcional ao número de fótons transmitidos por unidade de tempo. Os fótons podem ser absorvidos pelas moléculas de determinado gás, fazendo com que elas entrem em estado de excitação. Emitindo então um feixe de luz na frequência característica de um gás específico, ao atravessar uma secção contendo essa substância (secção de absorção) os fótons são absorvidos por essas moléculas.

A Figura 7 apresenta um desenho esquemático desse processo que servirá para deduzirmos matematicamente a Lei de Beer-Lampard.

Figura 7 – Desenho esquemático para a Lei de Beer-Lampard

Fonte : <http://pharmaxchange.info/press/2012/04/ultraviolet-visible-uv-vis-spectroscopy-%E2%80%93-derivation-of-beer-lambert-law/>

Considere um feixe paralelo de luz monocromática de intensidade I_0 , emitido contra uma amostra num plano como mostrado na Figura 7, tal que o feixe incida perpendicularmente a ele. Após percorrer o caminho de comprimento b da amostra, a qual contém N moléculas/cm³, a intensidade da luz se reduz para I_T , pois uma parte foi absorvida pelas moléculas.

Considerando agora a secção transversal de um bloco tendo área S e espessura infinitesimal dz posicionada a uma distância z a partir da face de incidência no bloco.

Se a amostra possui N moléculas/cm³, o número de moléculas presente no bloco infinitesimal será igual a $N \times S \times dz$.

Se cada molécula tem área da secção transversal igual a σ , onde os fótons de luz são absorvidos, então a fração da área total S onde a luz é absorvida pela presença da molécula é expressa por σ/S , sendo denominada *área fracional da molécula*.

A área fracional de todas as moléculas no bloco onde a luz é absorvida será obtida pela multiplicação do (número de moléculas) x (área fracional da molécula), ou seja:

$(N \times S \times dz) \times (\sigma/S)$, ou seja, será igual a $(\sigma \times N \times dz)$

Se I_z é a luz que incide no bloco infinitesimal considerado, e a luz que em parte é absorvida seja dI , a luz remanescente será então igual a $I_z - dI$. A fração de luz absorvida será dada por dI/I_z .

Essa área fracional estima a probabilidade de um raio de luz atingir uma molécula da substância considerada, a fração de luz absorvida no bloco será então igual à fração da área ocupada por todas as moléculas da substância no bloco, isto é:

$dI/I_z = - \sigma \times N \times dz$, o sinal negativo indica a absorção da luz.

Se integrarmos essa equação diferencial para toda a amostra variando de $z=0$ até $z=b$, onde b é o comprimento do caminho percorrido pelo feixe de luz, tem-se a solução:

$\ln I_T - \ln I_0 = - \sigma \times N \times b$ ou alternativamente,

$-\ln(I_T/I_0) = \sigma \times N \times b$ ou

$\ln(I_0/I_T) = \sigma \times N \times b$

Para simplificar a equação e se valer de definições já conhecidas, basta mudar a base do logaritmo, para tanto basta lembrar que:

$\ln(10) \cdot \log(x) = \ln(x)$, aparecendo daí a constante 2,303 indicativa da mudança de base. Logo:

$\log(I_0/I_T) = \sigma/2,303 \times N \times b$, do lado esquerdo desta equação tem-se a definição de Absorvância (A). A medida de concentração, em moles/litro, da substância será dada por:

$c = Nx1000 / 6,02214129 \times 10^{23}$ (número de Avogadro).

Com base nessas definições pode-se reescrever a equação como:

$\log(I_0 / I_T) = [(\sigma \times 6.022 \times 10^{20})/2.303] \times c \times b$

renomeando a constante entre parênteses por ϵ tem-se:

$A = \epsilon.c.b$

Para finalidade do RSD a medida de interesse é o valor de c , que poderá facilmente ser calculado por:

$$c = A / (\epsilon \cdot b)$$

ϵ é o *coeficiente de extinção molar* ou *absorvidade molar* da substância.

3.5.2 Forma de medição

A unidade mede o total de moléculas ao longo do caminho do feixe de luz. São medidos os parâmetros CO, CO₂, HC e NO (detalhes na Figura 8). São efetuadas as contagens na frente do veículo e na traseira, a diferença dessas medições aponta o total emitido pelo veículo que acabou de passar. Três quocientes são obtidos: $\Delta\text{CO}/\Delta\text{CO}_2$, $\Delta\text{HC}/\Delta\text{CO}_2$ e $\Delta\text{NO}/\Delta\text{CO}_2$. Caso perfeitamente especificado o combustível, esses quocientes podem ser utilizados na equação de combustão para obtenção dos valores em concentração: % CO, % CO₂, ppm HC e ppm NO.

3.5.3 Tratamento dos Valores negativos

Existem duas situações nas quais se podem observar valores negativos:

- a) A pluma do veículo anterior não se dissipou completamente (veículos com elevadas emissões podem levar a esse fato) e um novo veículo é medido. Nesse caso a contagem antes da passagem será superior à observada depois da passagem;
- b) Veículos com baixíssima emissão podem levar a leituras negativas devido à precisão do analisador.

No primeiro caso a medição ficou comprometida e o resultado deve ser descartado, já no segundo caso, o resultado deve ser considerado, principalmente nos casos de identificação dos veículos com baixa emissão [*low emitters*] e visando a caracterização das emissões de uma frota. Se removidos, isso introduzirá um viés positivo nos resultados. Neste caso, o valor negativo é substituído pelo valor zero, como é feito na NBR 6601 ou adiciona-se uma constante (igual ao mínimo) de tal maneira que todos os valores se tornem positivos, ao final essa constante é retirada, voltando à escala original. Essa foi a opção que empregamos nas análises.

3.5.4 A precisão dos resultados

As medidas de precisão são obtidas em função do percentual de CO₂ na pluma. Na Tabela 6 são apresentados os valores para plumas de CO₂ > 20% e na Tabela 7 para as plumas com 20% ou menos de CO₂ na pluma. Esses valores e parâmetros são do equipamento RSD4600 utilizado no levantamento dos dados em São Paulo.

Tabela 6 – Valores de precisão nas medições feitas com RSD4600 – CO₂ > 20%

Parâmetro	Valores absolutos e relativos
CO%/CO ₂ %	±0,007 ou ±10% do valor lido, o que for maior.
ppmHC / CO ₂ %	±6,6 ou ±10% do valor lido, o que for maior.
ppmNO / CO ₂ %	±10 ou ±10% do valor lido, o que for maior.
CO %	±0,1 ou ±10% do valor lido, o que for maior.
ppmHC (propano)	±100 ou ±10% do valor lido, o que for maior.
ppmNO	±150 ou ±10% do valor lido, o que for maior.

Fonte: ESP RSD4600 Brochure

Tabela 7 – Valores de precisão nas medições feitas com RSD4600 – CO₂ ≤ 20%

Parâmetro	Valores absolutos e relativos
CO%/CO ₂ %	±0,015 ou ±15% do valor lido, o que for maior
ppmHC / CO ₂ %	±10 ou ±15% do valor lido, o que for maior
ppmNO / CO ₂ %	±10 ou ±15% do valor lido, o que for maior
CO %	±0,15 ou ±15% do valor lido, o que for maior
ppmHC (propano)	±150 ou ±15% do valor lido, o que for maior
ppmNO	±225 ou ±15% do valor lido, o que for maior

Fonte: ESP RSD4600 Brochure

3.5.5 Eliminação da interferência do vapor de água

Uma fonte de interferência na medição dos hidrocarbonetos são gotículas de água, vapores etc. isso se deve ao fato delas possuírem comprimentos de onda de

próximos ao do HC. Deve-se então controlar a umidade relativa do ar e quando ela for muito elevada e igualmente estiverem sendo observados elevados valores de HC, essas medições devem ser descartadas pela interferência gerada. A partir da versão RSD 5000 esse controle já é feito pelo próprio equipamento, pois ele é capaz de detectar vapores e gotículas de água na pluma, e como elas consomem parte da banda associada ao HC, os dados desse parâmetro devem ser invalidados. Essa capacidade ajuda também a identificar os veículos não devidamente aquecidos [*warmed up*] e, portanto, emitindo vapores de água junto à pluma pelo escape, neste caso, as medições devem ser invalidadas, pois o veículo não está nas condições ideais para que sejam feitas as medições.

O novo equipamento RSD5000 na verdade mede tolueno com comprimento de onda próximo a 260nm, onde não há interferência da água. Plotando as medidas de tolueno versus o HC foi constatado que as diferenças podem corretamente serem atribuídas ao aumento das emissões de HC (BURGARD et. al.,2006a).

3.6 O equipamento RSD4600

O equipamento utilizado pela *Remote Sensing do Brasil* para o levantamento dos dados foi o RSD4600 da empresa *Environmental System Products, Inc.* - ESP, na época pertencente ao grupo *Envirotest Systems Holding Corp.*, essa empresa, em 2012, teve seus direitos de comercialização deste equipamento adquiridos em Opus Prodox AB para o mercado dos EUA. A ESP continua com a comercialização desse equipamento no Canadá e no México com a marca *Envirotest*.

A tecnologia foi desenvolvida pela Universidade de Denver (EUA) na década de 1980 e já em 1992 a ESP criou a primeira unidade RSD para ser comercializada.

3.6.1 Componentes do sistema

O RSD4600 é formado pelos seguintes módulos:

- analisador de gases com módulo de emissão e detecção, com célula de gás de calibração e Caixa de exaustão de gases [*gas dispenser box*];
- conjunto de espelhos dispostos em ângulos;
- câmara de vídeo para captura da placa do veículo;

- módulo de medição da velocidade e aceleração do veículo;
- computador com software para aquisição de dados e monitoramento em tempo real;
- sensor de movimento para detectar a chegada de um veículo para medição;

Nas Figuras a seguir são expostos em detalhe os diversos componentes do RSD4600.

Figura 8 – Módulo Fonte e Receptor do Analisador de gases

Fonte: ESP RSD4600 Brochure

Este módulo utiliza feixe Ultravioleta – UV na faixa de 224 a 230nm para medir o NO e Infra-vermelho – IR na faixa de 3,6 a 4,4 μm para medir CO, CO₂ e HC.

Figura 9 – Conjunto de espelhos dispostos em ângulo de 90°. [Corner Cube Mirror]

Fonte: ESP RSD4600 Brochure

Figura 10 – Módulo detector de velocidade e aceleração do veículo [Detector/Emitter Bars]

Fonte: ESP RSD4600 Brochure

Este detector opera com um módulo de laser visível a 635 nm e 4,2 mw, classe de laser IIIa.

A precisão para a velocidade é de ± 1 mph para velocidades entre 5 e 70 mph; para aceleração é de $\pm 0,5$ mph/s na mesma faixa de velocidades.

Figura 11 – Câmara de vídeo para captura da placa do veículo

Fonte: ESP RSD4600 Brochure

Câmera com zoom ótico de 18x + 12x digital que detecta imagens com menos de 1

lux de iluminação, possui capacidade de movimentação de 60 graus na horizontal e 50 graus na vertical sendo totalmente operada por software através do computador acoplado.

Figura 12 – Módulo dispensador de gases [Gas Dispenser Box]

Fonte: ESP RSD4600 Brochure

Esse módulo executa a auditoria das medições dos gases, podendo ser operado manual ou automaticamente.

O gás padrão tem as seguintes concentrações: CO=4%, CO₂=12%, HC=1200 ppm e NO=2000 ppm. O RSD4600 somente libera as medições quando os testes de auditoria são todos aprovados, caso contrário o equipamento fica bloqueado até que seja resolvido o problema e nova auditoria seja executada e aprovada. Essa auditoria normalmente é feita a cada hora ou quando os veículos tem elevadas emissões ou ainda quando a umidade relativa do ar estiver elevada.

Figura 13 – Medidores de temperatura e pressão atmosférica ambiente

Fonte: ESP RSD4600 Brochure

Figura 14 – Computador com software integrado que grava os dados e a imagem do veículo

Fonte: ESP RSD4600 Brochure

Figura 15 – Monitoramento e Registro de ocorrências em tempo real

Fonte: ESP RSD4600 Brochure

Figura 16 – Sensor de presença para identificação da chegada de veículo

Fonte: ESP RSD4600 Brochure

Este sensor detecta quando um veículo se aproxima da área de medição e aciona a câmara para filmagem e foto da placa do veículo. Uma medição dos gases imediatamente antes da passagem do veículo é efetuada, o valor observado será descontado da medição na traseira do veículo. A emissão devido ao veículo será a diferença dessas duas medidas.

Há possibilidade de acoplamento de um GPS para captura automática das coordenadas onde a medição está sendo realizada.

3.6.2 Novo equipamento RSD

A atual versão do equipamento agrega os 35 anos de experiência com esta tecnologia, além de contar com outras tecnologias igualmente inovadoras. O RSD5000 opera utilizando *Wi-Fi* e possui capacidade de comunicação sem fio usando tecnologia **3G**. Essas características permitem inclusive o acompanhamento em tempo real das medições.

Além dessas inovações tecnológicas, novos parâmetros foram introduzidos: NH_3 e SO_2 (que podem ser medidos simultaneamente ao NO com um único espectrofotômetro), opacidade, NO_2 , H_2O e emissão evaporativa em condição de uso.

O trabalho que apresenta o método para medição dos gases NO_2 , SO_2 e NH_3 foi publicado por BURGARD et. al. (2006b) sendo que já foram realizados estudos com os poluentes SO_2 , NH_3 , NO_2 e Material particulado, (STEDMAN et.al., 2009; KUHNS

et.al., 2004).

Uma tecnologia similar está em fase de desenvolvimento no MIT – *Massachusetts Institute of Technology*, para avaliar o N₂O utilizando *infrared laser differential absorption spectrometer* –TILDAS (JIMÉNEZ-PALACIOS JL, 2000; JIMÉNEZ-PALACIOS JL,1999).

O Programa de Inspeção Veicular de Connecticut aplicou uma variação do RSD empregando tecnologia laser o **EDAR – Emission Detection And Reporting**.(St.DENIS, 2015).

Na publicação da USAID – *U.S. Agency for International Development* - relativa às experiências e melhores práticas em programas de inspeção e manutenção (USAID, 2004), o papel do sensoriamento remoto já era apontado como ferramenta de apoio à atividade de controle das emissões, identificando os veículos que provavelmente não atendem aos limites estabelecidos para ele. O relatório aponta que com a evolução da tecnologia, ela poderá auxiliar na própria definição e ajustes de Programas de I/M. De fato, o governo da Espanha, incluiu a tecnologia de sensoriamento remoto em seu *Plan Nacional de Calidad Del Aire y Protección de la Atmósfera 2013-2016* [Plano Nacional de Qualidade do Ar e Proteção da Atmosfera – 2013-2016] para identificação dos grandes poluidores [*high emitters*] (ESPAÑA, 2013). Em 2015 foi conduzido pelo governo da Espanha o Projeto *Control Remoto de Emissiones Del Trafico* – CORETRA tendo por objetivos a validação metrológica do equipamento RSD4600 e o levantamento das emissões da frota circulante espanhola em 2015. O projeto comprovou a precisão das medições feitas com o RSD4600 e levantou os percentuais de veículos com elevadas emissões segundo as fases do programa de controle das emissões veiculares da União Européia. (CORDEIRO, 2016)

Nos Estados Unidos, onde essa tecnologia foi desenvolvida na Universidade de Denver, ela já é empregada em diversos estados em seus Programas de I/M. Diversas pesquisas também continuam sendo feitas com esse tipo de equipamento.

Na Tabela 8 é apresentada uma relação de diversos empregos dessa tecnologia, a partir dela se observa que seu uso mais freqüente é para identificação dos veículos altamente poluidores [*high emitters*] e para caracterização das emissões de uma frota de interesse.

Tabela 8 – Relação de alguns estudos e projetos que utilizaram RSD

Aplicação efetuada com SR tendo resultados aprovados para a finalidade	Local/Ano	n	Finalidade do estudo suportada pelo RSD					
Estudo / Projeto			H E	C S	H E I	Avaliar Programa	Emissão Frota	O B D
On-Road Emissions Changes Due to IM240 Inspection/Maintenance and Oxygenated Fuel Program, CDPHE (AUSTIN et.al. 2004)	Colorado/ 1996	92000				• (I/M e MTBE)		
Using Remote Sensing Devices (RSD) to Evaluate the California Smog Check Program, Radian/BAR (AUSTIN et.al. 2004)	California/ 1997	3500000				• (Smog check)		
The Denver Remote Sensing Clean Screening, ESP, CDPHE (AUSTIN et.al. 2004)	Colorado/ 1999	150000	•	•				
Remote Sensing Device High Emitter Identification With Confirmatory Roadside Inspection, CA BAR (AUSTIN et.al. 2004)	California/ 2001	18476	•					
Virginia Remote Sensing Device Study, ESP/VA (AUSTIN et.al. 2004)	Virginia/ 2002	900000	•	•	•	• (Smog check)		
Gateway Clean Air Program, ESP/MO (AUSTIN et.al. 2004)	Missouri/ 2002	4900000		•				
On-Road Remote Sensing of Automobile Emissions in the Chicago Area: Year 4; (AUSTIN et.al. 2004)	Chicago/ 2002	22065	•					
Evaluation of Remote Sensing in AZ, ERG/AZDEQ (AUSTIN et.al. 2004)	Arizona/ 2002	170000			•			
Evaluation of On-Board Monitoring Devices for Qualifying Taxis, CA ARB (AUSTIN et.al. 2004)	California/ 2003	691	•	•				•
On-road remote sensing of vehicle emissions in the Auckland Region (FISHER et.al., 2003)	Auckland/ 2003	52000	•				•	
On-Road Emissions from Heavy-Duty Diesel Vehicles in California; Year 5, 2012 (BISHOP et.al.2005)	Omaha/ 2004	34871	•				•	
On-road remote sensing of petrol vehicle emissions measurement and emission factors estimation in Hong Kong (CHAN et.al.2004)	Hong Kong/ 2004	10781	•				•	
Remote Sensing of Vehicle Emissions in Sri Lanka (SRI LANKA, 2005)	Sri Lanka/ 2005	100000	•				•	
Evaluation of European Road Transport Emission Models Against On-Road Emission Data as Measured by Optical Remote Sensing (SJÖDIN, 2008)	Goteborg/ 2007	15590					•	
Remote Sensing in four cities to determine the change in on-road vehicle fleet emissions over time (SLOTT, 2007)	Phoenix, Denver, Chicago, LA/2006	234816					•	

Continua

Estudo / Projeto	Local/Ano	n	H E	C S	H E I	Avaliar Programa	Emissão Frota	O B D
Emission Changes Resulting from the San Pedro Bay, California Ports Truck Retirement Program (BISHOP et. al, 2012)	California/ 2008	15892				•		
Mobile source emission estimates using remote sensing data from Mexico cities (GÓMES et. al. 2009)	Mexico/ 2009	42959					•	
Remote Measurements of On-Road Emissions from Heavy-Duty Diesel Vehicles in California; Year 5, 2012 (BISHOP, 2013)	California/ 2012	2547				•	•	
Remote Sensing Device Trial For Monitoring Heavy-Duty Vehicle Emission (Envirotest CANADA, 2013)	Vancouver /2012	35337	•				•	
The importance of high vehicle power for passenger car emissions (CARSLAW et.al. 2013)	UK/ 2012	67000					•	
Bericht und Auswertung RSD Messungen 2012 (GÖTSCH, 2013)	Zurich/ 2012	25745						
Caracterización de las emisiones del tráfico en Granolleres (GALA, 2012)	Catalunia/ 2012	9974	•				•	
Correlação de Resultados de Inspeção em Marcha Lenta e Medições por Sensoriamento Remoto. (BRANCO et.al. 2012d)	São Paulo/ 2012	500000				•	•	
On-Road Remote Sensing of Automobile Emissions in the Tusla Area: Fall 2013 (BISHOP, 2014)	Oklahoma / 2013	29268					•	
Vehicle Emission Measurement and Analysis - Cambridge City Council (TATE, 2013)	Cambridge /2013	15391	•				•	
New emission deterioration rates for gasoline cars – Results from long-term measurements (KLEEFELD, 2015)	Zurich/ 2013	113121					•	
Remote sensing of NO ₂ exhaust emission from road vehicles (CARSLAW et.al. 2013)	London/ 2012	93000					•	
HEI: High Emitter Index; HE: High Emitter; CS: Clean Screening; OBD: On Board Diagnostic; n: número de medições								

Fonte: Elaborada pelo autor com base na revisão sistematizada feita

Conforme se pode observar na Tabela 8 apenas dois projetos efetuaram mais de 2 milhões de medições. O levantamento da Cidade de São Paulo foi então o terceiro maior estudo empregando a tecnologia de sensoriamento remoto no mundo e o primeiro, dentre os três, que empregou o RSD4600 (versão mais moderna do equipamento) isso numa frota com características singulares devido ao combustível (gasool) e à tecnologia flex numa parcela significativa da frota.

Na realidade brasileira, o emprego do SR na identificação dos grandes emissores trará três benefícios: identificar os veículos desregulados e em más condições de

manutenção (mesmo que ele tenha evadido do Programa I/M); avaliar os veículos que deixaram de fazer a inspeção (seja por liberação ou por evasão), podendo obrigar o proprietário a efetuar a inspeção do mesmo; e identificar os veículos “preparados” apenas para passar na inspeção, retornando na seqüência para sua real condição de elevada emissão (infelizmente algumas oficinas alugam catalisadores e até motores inteiros só para o veículo ser aprovado). (JT 06/10/2010 – Cidades). Com o emprego regular desta tecnologia essa prática desaparecerá.

3.7 A tecnologia de SR na avaliação das emissões veiculares

Sensoriamento Remoto (SR) é a tecnologia que permite que veículos automotores possam ter suas emissões de gases emitidos pelo escapamento, em condições de uso e na própria via, avaliados de maneira rápida e com baixo custo.

Essa tecnologia se divide em quatro partes, cada uma com seu propósito bem definido:

- um módulo de detecção de velocidade e aceleração do veículo (1);
- um módulo transmissor/receptor para análise dos gases (2);
- um conjunto de espelhos refletores (2); e
- uma câmara de vídeo (3).

A disposição desse conjunto pode ser observada na Figura 17, a seguir. Ela ilustra como devem ser montados os equipamentos em campo para efetuar as medições usando o RSD4600.

Figura 17 – Disposição dos equipamentos para medição dos gases de escape

Fonte: CITA (2007)

Esse aparato deve ser montado somente em vias que atendem a requisitos especiais para garantir a validade das medições e a segurança dos usuários e operadores. Na Figura 18 são apresentadas fotografias ilustrativas de alguns locais de amostragem. No Anexo C consta a relação dos 36 pontos monitorados e o mapa apontando a distribuição geográfica dos mesmos na cidade de São Paulo.

Figura 18 – Fotos ilustrativas de locais de amostragem em São Paulo – Capital

Av. Prof. Frederico Hermann Jr. PINHEIROS

Av. Prof. Carvalho Pinto PENHA

Continua

Av. Zaki Narchi VILA GUILHERME

Estrada da Conceição SANTANA

Fonte: Environmental/RSdB/BR Inspeções

3.8 Requisitos e condições para validação das medições usando SR

Existem algumas condições nas quais essa técnica foi desenvolvida e que precisam ser atendidas para que as medições sejam validadas, são elas:

- o veículo deve estar em condição de carga moderada e dentro de limites de velocidades próprios para o método;
- o veículo precisa estar aquecido, condição na qual emite o mínimo de vapor de água na pluma que sai do escape;
- a pista deve ser relativamente plana com pequena inclinação positiva, deve possuir um único sentido, não ficar em áreas residenciais (tráfego local) e deve estar seca;
- a aceleração não pode ser abrupta no momento da medição; e
- Devem ser observadas as seguintes condições ambientais: temperatura entre 7°C e 49°C, umidade entre 5% e 95%, luz consistente, altitude entre -305m e 3048m.

3.9 Aplicações para o Sensoriamento remoto

Existem pelo menos três grandes aplicações para a tecnologia de sensoriamento remoto que são consagradas e aprovadas pela USEPA:

- identificação dos veículos com baixíssima emissão [*low emitters*] (EPA 420-p-98-007);
- identificação dos veículos com elevadas emissões [*high emitters*] (EPA/AA/AMD/EIG/96-01); e
- avaliação de Programas de I/M (EPA 420-B-02-001)

Diversas outras surgiram em face da sua facilidade de operação e custo reduzido. As mais conhecidas são: Auditoria de um centro de inspeção veicular visando identificar operação fraudulenta; Identificação de transgressores da legislação; Identificação de veículos com elevada emissão evaporativa; Caracterização da frota circulante; Avaliação do impacto de medidas impactante nas emissões, como o aumento do percentual de etanol na gasolina ou emprego de aditivos.

3.10 Filtros de dados

A maioria dos estudos fixa critérios para o aceite dos dados, este procedimento visa garantir a qualidade dos dados gerados em face do processo de aquisição de dados através da espectroscopia empregada no RSD.

Na Tabela 9 são apresentados os valores adotados em quatro locais onde o monitoramento utilizando a tecnologia de sensoriamento remoto é regular.

Tabela 9 – Filtros de dados aplicados em programas regulares de SR nos EUA

Filtros	Chicago	Denver	Los Angeles	Phoenix
HC,CO,NO, velocidade, aceleração	Sim	Sim	Sim	Sim
Tipo veículo leve Otto	Autos e utilitários	Autos e utilitários	Autos e utilitários	Autos e utilitários
VSP (kW/t)	>3	>3	>3	>3
Idade (anos)	1 a 15	1 a 15	1 a 15	1 a 15
Velocidade (mph)	8 a 40	10 a 30	12 a 20	20 a 50
Aceleração (mph/s)	0 a 8	-1 a 6	0 a 5	0 a 13

Fonte: SLOTT (2007)

Como se observa na Tabela 9, não há consenso para os filtros de velocidade e aceleração, para os demais parâmetros os critérios são os mesmos. Nossa opção então foi pesquisar o comportamento do ciclo que compõe o Teste IM240.

Nas Figuras 19 e 20 é apresentado o comportamento conjunto da velocidade e aceleração deste ciclo.

Figura 19 – Distribuição conjunta da Velocidade (mph) e aceleração (mph/s) do

Fonte: Elaborada pelo autor

É possível observar nesta figura que três áreas apresentam maior concentração de pontos de velocidade x aceleração: uma com pequena aceleração e velocidade próxima de 50 milhas por hora (80 km/h); outra com velocidade próxima de 30 milhas por hora (48 km/h) e a condição de marcha lenta na qual velocidade e aceleração são nulas. Na Figura 20 a seguir foi ajustada uma distribuição para melhor visualização desses pontos de concentração.

Figura 20 – Densidade da Velocidade e da aceleração do Ciclo praticado no IM240

Fonte: Elaborada pelo autor

As distribuições conjuntas dos dados de velocidade e aceleração obtidos pelo RSD4600 na Cidade de São Paulo, no período de 22/01/2009 a 25/02/2010, num total de **875.415** registros, estão apresentadas nas Figuras 21 e 22, a seguir.

Figura 21 – Distribuição conjunta da Velocidade (Km/h) e aceleração (Km/h/s) do

Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 22 – Densidade conjunta da Velocidade e Aceleração no Remote Sensing SP - N=875.415

Fonte: Elaborada pelo autor

Os valores que foram adotados para filtrar pela Velocidade e Aceleração serão:

Filtro para a Aceleração: **-2,0 (Km/h).s⁻¹ até +3,5 (Km/h).s⁻¹**

Filtro para a Velocidade: **15 km/h até 50 km/h.**

Esses valores ficam muito próximos daqueles adotados em Denver.

Outro parâmetro que interfere no cálculo da VSP é a inclinação da via. Em nosso estudo a inclinação foi sempre ligeiramente positiva, a inclinação média foi 5,37° [3,30° ---- 7,20°]. A amplitude de variação para VSP foi de [-9,83 ---- +28,85] kW/t.

A equação empregada para o cálculo de VSP é devido Jiménez-Palacios (1999) podendo ser encontrada em (FREY, 2003), a qual segue explicitada:

$$VSP = (0,447 \times v)[1,1(0,447 \times a) + 9,81 \sin(R) + 0,132] + 0,000302 (0,447 \times v)^3$$

Onde: **a** é a aceleração (Milha/hora/s), **R** é o ângulo de inclinação, em graus, **v** é a velocidade em milhas/hora. A constante 0,447 transforma milhas/h em m/s.

Para o nosso objetivo, foi necessário considerar somente as medições que tenham valores de VSP dentro de uma faixa na qual ela não afete significativamente as emissões. Conforme Jiménez-Palacios (1999), “a maioria das emissões transientes elevadas ocorrem com valores muito baixos ou muito elevados de VSP”.

4. RESULTADOS

A quantidade total de veículos medidos na Cidade de São Paulo pelo sensoriamento remoto que serviram de base para os resultados que se seguem foi de **179.142** veículos leves em uso e pertencentes ao ciclo Otto.

A distribuição desses veículos por tipo de combustível é apresentada na Tabela 10, na Tabela 11 é apresentada a distribuição segundo as fases do Proconve.

Tabela 10 – Distribuição da frota de veículos leves pesquisada segundo o combustível

COMBUSTÍVEL	NÚMERO	PERCENTUAL
ETANOL	2001	1,12%
GASOOL	62384	34,82%
METANO	5	0,00%
GASOOL/GNV	65	0,04%
ETANOL/GNV	42	0,02%
ETANOL/GN	196	0,11%
GASOOL/GN	2253	1,26%
FLEX	106750	59,59%
FLEX/GN	5446	3,04%
TOTAL	179142	100,0%

Fonte: Elaborada pelo autor

Como se observa, os veículos Flex constituem a maioria da frota de veículos leves do ciclo Otto da cidade de São Paulo.

Os percentuais de veículos flex e gasool em toda a frota inspecionada pelo Programa I/M no exercício de 2010 foram 56,9% e 33,2%, respectivamente.

Como foram empregadas as informações do DETRAN-SP para identificação das características do veículo, dentre elas o combustível, os códigos GNV e GN são relativos aos veículos convertidos a GNV.

Tabela 11 – Distribuição da frota pesquisada segundo as Fases do Proconve

FASE DO PROCONVE	NÚMERO	PERCENTUAL
PRÉ (até 1988)	938	0,52%
L1 (1989-1991)	649	0,36%
L2 (1992-1996)	3179	1,77%
L3 (1997-2005)	61667	34,42%
L4 (2006-2008)	105078	58,66%
L5 (>2008)	7631	4,26%
TOTAL	179142	100,00%

Fonte: Elaborada pelo autor

Na Tabela 12 é apresentada a distribuição da frota de veículos leves do ciclo Otto segundo seus fabricantes.

Tabela 12 – Distribuição da frota pesquisada segundo o fabricante do veículo

FABRICANTE	NÚMERO	PERCENTUAL
GM	45491	25,39%
FIAT	39112	21,83%
VW	28870	16,12%
FORD	19221	10,73%
HONDA	13458	7,51%
RENAULT	7076	3,95%
TOYOTA	6825	3,81%
PEUGEOT	6742	3,76%
CITROEN	5199	2,90%
OUTRAS	7148	3,99%
TOTAL	179142	100,00%

Fonte: Elaborada pelo autor

Na Tabela 13 é apresentada a distribuição da frota pesquisada segundo a medida da Potência Específica do Veículo (VSP) efetuado no instante da medição dos poluentes pelo equipamento de sensoriamento remoto - RSD.

Tabela 13 – Distribuição da frota pesquisada segundo as faixas de VSP

VSP [kW / t]	NÚMERO	PERCENTUAL
[-10,-5)	751	0,419%
[-5,0)	16839	9,400%
[0,5)	98330	54,889%
[5,10)	56982	31,808%
[10,15)	5679	3,170%
[15,20)	494	0,276%
[20,25)	63	0,035%
[25,30)	4	0,002%
TOTAL	179142	100,00%

Fonte: Elaborada pelo autor

A grande maioria das medições (~87%) foi feita na faixa de 0 a 10 kW/t.

Na Figura 23 é apresentado o histograma com todos os valores de VSP da frota pesquisada.

Figura 23 – Histograma do valor de VSP dos veículos da frota pesquisada.

Fonte: Elaborada pelo autor

O perfil unimodal desta distribuição mostra a qualidade das medidas de campo, seja pela inclinação da pista ou pelas velocidades e acelerações medidas dos veículos que passavam pelos sensores. Caso alguns pontos tivessem inclinações significativas, a forma da distribuição seria multimodal, pois haveria um deslocamento da distribuição dos valores de VSP observados nestes locais.

Nas figuras de 24 a 32 observamos grandes quantidades de *outliers*, eles provavelmente foram gerados a partir de amostragens de veículos *High emitters*.

Na Figura 24 são apresentados os diagramas *boxplot* por ano-modelo do veículo para os índices dos poluentes CO, HC e NO. O impacto das fases do Proconve fica claro para os poluentes CO e HC, para o NO não foi observada redução das emissões com o passar do tempo, pelo contrário, um pequeno aumento foi observado nos últimos anos. Na discussão são avaliados possíveis fatores que possam ter levado a este comportamento diferenciado das emissões de NO.

Na Figura 25 é apresentado o comportamento das emissões dos poluentes segundo as fases do Proconve, ela deixará mais evidente o impacto do programa nas emissões dos poluentes.

Figura 24 – Evolução das emissões dos poluentes CO, HC e NO com o Ano-Modelo do veículo.

(A faixa central é a mediana, o limite superior da caixa é o terceiro quartil, o inferior é o primeiro quartil e os limites superior e inferior são dados por $(Q3 + 1,5J)$ e $(Q1 - 1,5J)$, sendo $J = Q3 - Q1$, a Junta)

Fonte: Elaborada pelo autor

Na Figura 25 fica claro o impacto das fases do Proconve nas emissões dos poluentes atmosféricos emitidos pelos veículos leves do ciclo Otto.

Para o CO, uma pequena redução foi obtida na Fase L2, mas o impacto foi acentuado a partir da Fase L3; já para o HC, somente a partir da Fase L3 observou-se impacto significativo na redução das emissões deste poluente. As emissões de NO não apresentaram impacto devido às fases do Proconve, ao contrário, o que se observa é um pequeno aumento nas Fases L4 e L5, o que não era o esperado.

Figura 25 – Impacto das fases do Proconve nas emissões dos poluentes.

Fonte: Elaborada pelo autor

Na Figura 26 é apresentado o comportamento dos poluentes emitidos segundo as faixas de Potência Específica do Veículo – VSP.

Figura 26 – Distribuição das emissões segundo a potência específica do veículo – VSP

Fonte: Elaborada pelo autor

Como se pode constatar, o comportamento das emissões de NO nas fases do Proconve não foi afetado pela distribuição da VSP. Os quatro veículos com VSP acima de 25 kW/t serão retirados dos ajustes dos modelos que testarão a influência dos fatores sobre as emissões por falta de representatividade para essa classe de VSP.

A distribuição do VSP igualmente não impactou as emissões de CO e HC, veja que foram praticamente constantes em todas as faixas até os 25 kW/t.

Nas Figuras de 27 a 29 são apresentados os comportamentos dos poluentes CO, HC e NO, segundo as faixas de VSP [kW/t] e tipo de combustível.

Figura 27 – Comportamento das emissões de CO segundo VSP e combustível

Fonte: Elaborada pelo autor

Não há indicação de que a VSP interfira significativamente nas emissões de CO para todos os tipos de combustível. A conversão para GNV elevou os níveis médios de emissão, como pode ser visto nos resultados dos veículos FLEX comparados com os FLEX/GN convertidos para operar também com gás (são os dois últimos grupos na Figura 27).

Para todos os poluentes não há evidência de comportamento diferenciado para as faixas de VSP. Veja que em todos os casos os Intervalos Inter-quartis possuem pontos em comum entre as faixas de VSP.

Nas Figuras de 30 a 32 são pesquisados os efeitos do combustível e da Fase do Proconve nas emissões dos poluentes.

Figura 30 – Emissões do CO segundo as Fases do Proconve e combustível

Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 31 – Emissões do HC segundo as Fases do Proconve e combustível

Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 32 – Emissões do NO segundo as Fases do Proconve e combustível

Fonte: Elaborada pelo autor

Para as emissões de CO e HC o impacto das Fases do Proconve se faz presente, já para o NO dos veículos ciclo Otto movidos a gasool foi constatado um acréscimo significativo nas emissões das Fases L4 e L5. Para os veículos Flex o comportamento das emissões foi bastante próximo nas Fases L3, L4 e L5, não evidenciando impacto significativo nas emissões de NO por essa frota. Somente os veículos movidos exclusivamente a etanol responderam positivamente às fases do Proconve.

Para avaliarmos quais fatores precisam ser controlados para as definições dos veículos leves do ciclo Otto com emissões anormais [*high emitter*], foram ajustados Modelos Lineares utilizando a classe de modelos *GAMLSS* (RIGBY, 2005).

A primeira etapa desta metodologia é a identificação de qual distribuição descreve o comportamento dos índices de emissão de poluentes, considerando os dados transformados pelo logarítmo na base natural ou neperiana - $\ln$. Na Figura 33 são apresentados os histogramas dos índices de CO, HC e NO da frota de veículos pesquisada.

Figura 33 – Histogramas dos índices de emissão de CO, HC e NO – dados transformados usando a função $\ln$

Fonte: Elaborada pelo autor

Como se pode constatar, todas as distribuições possuem assimetria à direita.

Essa assimetria é provocada exatamente pelas emissões dos veículos altamente emissores de poluentes [*high emitters*], conforme será visto ao final das análises. Foi empregado o pacote **fitDist**, pertencente ao GAMLSS, para ajuste das distribuições. Ela estima os parâmetros μ (locação), σ (escala) e os parâmetros de forma ν e τ .

Como resultado se observou que para o $\ln(\text{CO}/\text{CO}_2)$ a distribuição identificada foi a **SHASHo** - *Sinh-Arcsinh*. Para o $\ln(\text{HC}/\text{CO}_2)$ a distribuição identificada foi a **GT** - *Generalized t*. Para o $\ln(\text{NO}/\text{CO}_2)$ a distribuição identificada foi a **SEP2** - *Skew Exponential Power type 2*.

As equações dessas distribuições podem ser achadas no Manual do GAMLSS que se encontra disponível no sítio <http://www.gamlss.org/>.

Uma vez identificadas as distribuições, é possível ajustar os modelos. Para tanto, incluímos os seguintes fatores: Faixas de VSP, Combustível e Fases do Proconve.

Na Tabela 14 são apresentados os resultados do ajuste para o modelo para o $\ln(\text{CO}/\text{CO}_2)$. Os níveis tomados por base foram: VSP[-10, -5], ETANOL e Pré-PROCONVE.

Tabela 14 – Resultados do ajuste para o modelo do $\ln(\text{CO}/\text{CO}_2)$

CO/CO ₂ Modelo	Estimativa	Erro padrão	t-valor	Pr(> t)
(Intercepto)	-3,1210	0,0972	-32,1200	<2e-16
VSP[-5,0)	0,0587	0,0772	0,7610	0,4469
VSP[0,5)	0,0504	0,0752	0,6690	0,5034
VSP[5,10)	0,0399	0,0758	0,5260	0,5987
VSP[10,15)	0,0425	0,0864	0,4920	0,6230
VSP[15,20)	0,0121	0,6992	0,0170	0,9862
GASOOL	0,1169	0,1729	0,6760	0,4989
GASOOL/GNV	0,0614	0,0596	1,0310	0,3029
ETANOL/GNV	0,0024	0,0793	0,0300	0,9758
ETANOL/GN	-0,0264	0,0409	-0,6450	0,5189
GASOOL/GN	0,0171	0,0207	0,8280	0,4079
FLEX	-0,0708	0,1643	-0,4310	0,6665

Continua

CO/CO ₂ Modelo	Estimativa	Erro padrão	t-valor	Pr(> t)
Fase L1	0,0233	0,0696	0,3350	0,7379
Fase L2	-0,0697	0,0602	-1,1580	0,2471
Fase L3	-0,0994	0,0582	-1,7060	0,0882
Fase L4	-0,1048	0,0613	-1,7110	0,0873
Fase L5	-0,1341	0,0704	-1,9040	0,0570

Fonte: Elaborada pelo autor

Como se pode observar, não foi significativo o impacto das faixas de potência específica dos veículos nas emissões de CO. O tipo de combustível também não influenciou significativamente as emissões de CO. Quanto às Fases do Proconve, um comportamento diferenciado foi observado nas emissões dos veículos das Fases L3, L4 e L5. Elas foram significativamente menores que aquelas observadas Antes do Proconve e nas suas Fases L1 e L2.

Observa-se então que para identificação dos veículos com elevadas emissões [*high emitters*] de CO deve-se controlar se eles pertencem às Fases L3, L4 ou L5.

Na Tabela 15 são apresentados os resultados do ajuste para o modelo para o $\ln(\text{HC}/\text{CO}_2)$.

Tabela 15 – Resultados do ajuste para o modelo do $\ln(\text{HC}/\text{CO}_2)$

HC/CO ₂ Modelo	Estimativa	Erro padrão	t-valor	Pr(> t)
(Intercepto)	4,6115	0,4537	10,1640	2e-16
VSP[-5,0)	-0,0254	0,4251	-0,0600	0,9523
VSP[0,5)	0,1130	0,4196	0,2690	0,7877
VSP[5,10)	0,1477	0,4207	0,3510	0,7256
VSP[10,15)	0,1952	0,4437	0,4400	0,6600
VSP[15,20)	0,3974	0,5319	0,7470	0,4550

Continua

HC/CO ₂ Modelo	Estimativa	Erro padrão	t-valor	Pr(> t)
GASOOL	0,2380	1,1959	0,1990	0,8423
GASOOL/GNV	-0,1349	0,2108	-0,6400	0,5221
ETANOL/GNV	0,0007	0,3766	0,0020	0,9985
ETANOL/GN	0,2359	0,1010	2,3360	0,0196
GASOOL/GN	0,0070	0,0563	0,1240	0,9011
FLEX	0,1917	0,2438	0,7870	0,4317
Fase L1	0,0023	0,2764	0,0080	0,9933
Fase L2	-0,0283	0,1774	-0,1600	0,8732
Fase L3	-0,2047	0,1669	-1,2270	0,2202
Fase L4	-0,2278	0,1736	-1,3120	0,1897
Fase L5	-0,7802	0,2352	-3,3180	0,0009

Fonte: Elaborada pelo autor

Como se pode observar, as Faixas de VSP não interferiram significativamente nas emissões de HC. Somente automóveis movidos a etanol e convertidos para GNV apresentaram emissões diferenciadas de HC, mas deve-se observar que essa frota é muito pequena (em 2010 era de 5851 veículos ou 0,19% da frota total da cidade de São Paulo) e com tendência à extinção e, portanto, não se justifica buscar critérios para veículos altamente poluidores para esse tipo de combustível.

Quanto às Fases do Proconve, a única que apresentou impacto significativo nas emissões de HC foi a Fase L5 reduções foram observadas nas Fases L3 e L4, mas em menor magnitude. Na Tabela 16 são apresentados os resultados do ajuste para o modelo para o $\ln(\text{NO}/\text{CO}_2)$.

Tabela 16 – Resultados do ajuste para o modelo do $\ln(\text{NO}/\text{CO}_2)$

NO/CO ₂ Modelo	Estimativa	Erro padrão	T-valor	Pr(> t)
(Intercepto)	3,7502	0,6050	6,1990	7,01e-10
VSP[-5,0)	-0,0171	0,3478	-0,0490	0,96087
VSP[0,5)	0,0876	0,3442	0,2540	0,79916
VSP[5,10)	0,1680	0,3447	0,4870	0,62602
VSP[10,15)	0,3529	0,3531	1,0000	0,31768
VSP[15,20)	0,0061	0,6609	0,0090	0,99266
GASOOL	0,2062	0,3545	0,5820	0,56093
GASOOL/GNV	-0,6280	0,0856	-7,3380	3,24e-13
ETANOL/GNV	-0,4673	0,3581	-1,3050	0,19199
ETANOL/GN	-0,3237	0,1075	-3,0090	0,00265
GASOOL/GN	-0,1874	0,0477	-3,9320	8,72e-05
FLEX	0,0670	0,1109	0,6040	0,54570
Fase L1	-0,2373	0,5289	-0,4490	0,65377
Fase L2	-0,2374	0,4974	-0,4770	0,63320
Fase L3	-0,0598	0,4952	-0,1210	0,90397
Fase L4	-0,1231	0,4974	-0,2470	0,80459
Fase L5	0,0958	0,5007	0,1910	0,84834

Fonte: Elaborada pelo autor

É fácil observar que somente os veículos convertidos para operar com gás apresentaram impacto significativo nas emissões de NO. VSP e Fases do Proconve não apresentaram efeitos significativos nas emissões. Como a frota de veículos convertidos é pequena e vem diminuindo na cidade de São Paulo, não se justifica buscar critérios para veículos altamente poluidores para esse tipo de automóvel. No Apêndice B são apresentados os modelos ajustados para cada um dos poluentes, a escolha do melhor modelo foi feita com base no *Critério de Informação de Akaike* – AIC (Buckland, 1997). Os gráficos com as distribuições *Quantil-Quantil* (QQ) para o modelo inicial e final (menor AIC) também são apresentados no Apêndice B.

Na Tabela 17 é apresentada a distribuição da frota de veículos inspeciona pelo

Programa I/M da Cidade de São Paulo no exercício de 2010, ela deixa claro que a frota é dominada pelos veículos flex e os movidos a gasool representando 90% do total da frota inspecionada. Resumindo, as características de emissão do monóxido de carbono, que refletiram o impacto da mudança tecnológica dos veículos induzida pelo Proconve, apontaram para a necessidade de estabelecimento de valores indicativos de veículos altamente poluidores para as Fases L3, L4 e L5 do Proconve. Sinaliza ainda para a necessidade de estabelecer novos limites para as futuras fases.

Tabela 17 – Distribuição da frota de veículos leves ciclo Otto inspecionada no Programa I/M exercício de 2010 segundo o combustível

COMBUSTÍVEL	I/M 2010	%
FLEX	1045070	33,29%
ETANOL	177879	5,67%
ETANOL/GN	726	0,02%
ETANOL/GNV	5851	0,19%
METANO	237	0,01%
FLEX/GNV	20762	0,66%
GASOGÊNIO	1	0,00%
GASOOL/GN	3105	0,10%
GASOOL/GNV	98919	3,15%
GASOOL	1786915	56,92%
GN	4	0,00%
TOTAL	3139469	100,00%

Fonte: Elaborada pelo autor

A frota é dominada pelos veículos movidos a gasool e pela categoria flex, os demais combustíveis foram retirados das análises que seguem.

Os modelos estatísticos apontaram ainda que as emissões desses três poluentes dos veículos Flex e daqueles movidos somente a gasool são relativamente próximas, o que não justifica estabelecer valores limites separadamente. Portanto, os limites serão estabelecidos para as Fases L3, L4 e L5 do Proconve e são válidos tanto para os veículos Flex quanto para os movidos somente a gasool. Vale observar que os veículos flex surgiram em 2003 na Fase L4 devendo atender os mesmos limites para CO e HC estabelecidos para os veículos movidos a gasool nos ensaios de marcha lenta do Programa I/M - SP. Todos os veículos convertidos para operar

com GNV foram retirados dessa análise para que as distribuições encontradas reflitam somente a condição de emissão do veículo teoricamente com as características originais de fábrica. Uma vez identificado que somente as Fases do Proconve interferiram significativamente nas emissões, é preciso identificar, para cada uma delas, as duas distribuições que se misturam associando-as às frotas de veículos com emissão “**normal**” daqueles com elevada emissão (***high emitters***).

Foi empregado o método iterativo para aproximação da função de verossimilhança, o **EM**, para identificação dessas distribuições e estimação dos seus parâmetros (Benaglia, 2009a). O pacote do *software* R que foi empregado para essa necessidade foi o **mixtools** (Benaglia, 2009b).

A abordagem foi inteiramente paramétrica considerando a mistura de duas distribuições *Gaussianas*. A função **normalmixEM** foi empregada e como resultado ofereceu as estimativas dos parâmetros das duas distribuições normais e o parâmetro *lambda* relativo à variável latente indicadora de veículos normais (proporção de veículos com emissões normais). Essas estimativas, por poluente e fases do Proconve, estão apresentadas na Tabela 18.

O algoritmo EM é amplamente utilizado nas técnicas de aprendizado não supervisionado [*unsupervised learning*] em Inteligência Artificial.

Nas Figuras 34, 35 e 36 são apresentadas as misturas das distribuições identificadas pela técnica para as fases L3, L4 e L5 do Proconve e para os poluentes CO, HC e NO, respectivamente.

As curvas em vermelho são das frotas de veículos com emissão normal segundo a fase do Proconve e poluente, as curvas em verde são relativas às frotas de veículos com emissões excessivas, acima do esperado para sua fase do Proconve e poluente.

Fixado um poluente e fase do Proconve, as proporções de veículos pertencentes a cada uma destas distribuições é exatamente a distribuição da variável latente (não pode ser medida diretamente) indicadora de veículo com emissões normais ou anormais para este poluente e fase tecnológica. Os valores de *lambda* indicam, portanto, as proporções de veículos pertencentes a cada uma destas distribuições gaussianas.

Figura 34 – Mistura de distribuições identificadas para os índices de CO - EM

Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 35 – Mistura de distribuições identificadas para os índices de HC - EM

Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 36 – Mistura de distribuições identificadas para os índices de NO - EM

Fonte: Elaborada pelo autor

Os parâmetros associados a estas distribuições estão apresentados na Tabela 18. Os valores de *lambda* são relativos às distribuições das **variáveis latentes** associadas à condição de veículo com elevadas emissões de poluentes [*high emitter vehicle*].

Tabela 18 – Parâmetros estimados das distribuições Gaussianas ajustadas para os índices de poluentes – dados transformados (*ln*)

Poluente	Fase	<i>lambda</i>		Média(μ)		Desvio(σ)	
		Normal %	HE %	Normal	HE	Normal	HE
CO	L3	62,25%	37,75%	-3,019733	-2,346986	0,1785325	0,6144841
	L4	70,55%	29,45%	-3,097640	-2,586898	0,1232572	0,5132330
	L5	80,55%	19,45%	-3,118599	-2,691142	0,1258257	0,4813513
HC	L3	50,30%	49,70%	3,526026	4,316673	0,2294173	0,5996441
	L4	62,27%	37,73%	3,416052	3,898543	0,1761595	0,4869285
	L5	82,41%	17,59%	3,464561	3,808146	0,1608930	0,4144450
NO	L3	59,01%	40,99%	3,026056	4,037919	0,3452406	0,5597630
	L4	53,13%	46,87%	3,063428	4,125857	0,3465660	0,6406402
	L5	53,19%	46,81%	3,179835	4,362698	0,3691238	0,5470041

Fonte: Elaborada pelo autor

Como se pode observar, a proporção da frota com elevadas emissões de CO e HC diminui com as Fases do Proconve, mas num nível aquém do esperado. Já para o NO esse fato não ocorre e a proporção se mantém num patamar bastante elevado. Na Tabela 19 são apresentados os valores limites para a condição de veículo com elevadas emissões [*high emitter vehicle*] e as respectivas probabilidades de detecção dessa condição com apenas uma única passada pelo RSD.

Para o cálculo das probabilidades apresentadas na Tabela 19, foram selecionadas as médias e desvios da frota *Normal* da Tabela 18, o valor limite para o veículo HE foi calculado da seguinte maneira: $\ln(\text{limite}) = \mu + 2,06 \cdot \sigma$, lembrando que para a distribuição Gaussiana $z_{98\%}=2,06$. De posse do valor limite, calculamos a área acima desse valor limite, mas agora considerando os parâmetros da distribuição associada aos veículos HE. A *Probabilidade de Detecção* do veículo HE é a probabilidade condicional do veículo emitir, durante sua passagem pelo RSD, uma quantidade acima do valor **limite**, dado que o veículo é um HE. Para esse cálculo de áreas abaixo das curvas Gaussianas empregou-se a função **pnormGC** do *software R*.

Tabela 19 – Valores limite do índice do poluente para identificação de veículos com elevada emissão segundo a fase do Proconve

Poluente	Fase do Proconve	High Emitter	Probabilidade de Detecção
CO	L3	0,0305	69,02%
	L4	0,0182	69,16%
	L5	0,0173	63,67%
HC	L3	29,5232	70,21%
	L4	18,7697	59,70%
	L5	19,5228	51,17%
NO	L3	41,9825	70,44%
	L4	43,7003	69,86%
	L5	51,4328	70,52%

Fonte: Elaborada pelo autor

Os valores apontados na Tabela 19 são relativos aos índices dos respectivos poluentes e fases do Proconve. A probabilidade de detecção apresentada, com apenas uma passada pelo equipamento de sensoriamento remoto, é relativa à condição de veículo com elevada emissão do poluente.

Para o cálculo destas probabilidades, para cada poluente e fase do Proconve, determina-se o percentil 98% da distribuição dos veículos com emissão normal (curva Gaussiana em vermelho nas figuras 34, 35 e 36). De posse deste valor p98, calcula-se a área a partir dele na curva Gaussiana dos veículos com emissões anormais (curvas em verde nas figuras 34, 35 e 36), ou seja, buscamos a proporção de veículos que são High emitters e que passarão pelo RSD emitindo um valor acima do p98 da sua fase do Proconve e para o poluente desejado (CO, HC ou CO).

5. DISCUSSÃO

A qualidade dos dados utilizados nesta pesquisa

Os critérios adotados neste trabalho para aceitação dos dados foram bem rígidos para garantir que as emissões efetivamente medidas não fossem comprometidas pelas condições de pistas nas quais elas foram feitas.

Na Figura 23 foi apresentado o histograma com dos valores de potência específica dos veículos – VSP. Ela mostrou um comportamento *unimodal* com média em torno de **3,5 kW/t**, esse fato atesta a qualidade da escolha dos pontos nas vias onde foram efetuadas as campanhas de monitoramento das emissões veiculares usando o RSD, caso contrário, a distribuição seria *multimodal*.

Mistura de duas distribuições para descrever o comportamento das emissões dos veículos;

As Figuras 34, 35 e 36 demonstram claramente a adequação da hipótese de que a mistura de duas distribuições caracteriza as emissões da frota, para o poluente e fase do Proconve fixados. A técnica de EM nos permitiu estimar as distribuições das *variáveis latentes* associadas às frotas de veículos normais e aos de elevada emissão [*high emitters*] para as fases L3, L4 e L5 do Proconve.

O impacto do Proconve nas emissões de CO e HC detectadas nas vias pelo SR em condição de uso

Através das medições efetuadas usando o RSD foi constatado o impacto nas emissões de CO a partir da Fase L2 do Proconve, sendo que a redução se acentuou nas demais Fases L3, L4 e L5.

Para as emissões de HC, foi detectada redução somente a partir da Fase L3, a redução se acentuou nas Fases L4 e L5 mas não foram na magnitude esperada se comparadas com as reduções impostas nos fatores de emissão dos veículos novos.

Para o NO não foi observada redução das emissões devido às Fases do Proconve, as emissões médias se mantiveram nas fases e houve pequeno aumento nas mesmas, o que não era esperado, redução nas últimas fases seria o esperado.

Os percentuais de *high emitters* [elevadas emissões] segundo o combustível e ano-modelo

Como se pode observar na Figura 37, o comportamento do percentual de *High emitters* devido ao NO teve a tendência de decréscimo revertida nos veículos ano-modelo de 2005 em diante. Quanto aos percentuais de *High emitters* por CO e HC, seus percentuais decrescem com o ano-modelo do veículo.

Figura 37 – Percentual de High Emitters em função do poluente e ano

Fonte: Elaborada pelo autor

Nas Figuras 38, 39 e 40 são apresentadas as proporções de veículos *High emitters* em função do Ano-modelo e tipo de veículo (gasool ou flex), para cada um dos poluentes pesquisados.

Figura 38 – Percentual de Veículos com elevada emissão de CO por ano-modelo e combustível/tecnologia – 2009/2010

Fonte: Elaborada pelo autor

Como se pode observar, a partir dos modelos 2006 a proporção de veículos com elevada emissão de CO vem decrescendo, sendo mais acentuada a queda nos veículos movidos a gasool.

Figura 39 – Percentual de Veículos com elevada emissão de HC por ano-modelo e combustível/tecnologia – 2009/2010

Fonte: Elaborada pelo autor

Para a proporção de veículos com elevadas emissões de HC, o comportamento foi bastante similar para os veículos movidos a gasool e os flex, inclusive com percentuais muito próximos para os modelos de 2007 a 2010.

Figura 40 – Percentual de Veículos com elevadas emissões de NO por ano-modelo e combustível/tecnologia – 2009/2010

Fonte: Elaborada pelo autor

Para as emissões de NO, os veículos movidos a gasool apresentaram percentuais significativamente superiores aos mesmos anos-modelos dos veículos flex. A queda que vinha sendo observada nos modelos a gasool de 1999 a 2005, foi revertida e passou a crescer o percentual de *high emitters* ultrapassando os 70% em 2009!

Na seqüência serão analisadas diversas hipóteses que poderiam ter levado a esse comportamento.

O comportamento das emissões de NO detectado pelo SR nas condições de uso dos veículos

Foram pesquisados alguns possíveis fatores que pudessem justificar o comportamento das emissões de NO dos veículos automotores leves do ciclo Otto que não responderam positivamente às fases do Proconve.

São eles: Possível emissão dos veículos Flex operando com etanol; a inclinação das pistas impactando na VSP dos veículos; veículos mais novos com menores emissões de CO₂. Foi também pesquisado um possível impacto na qualidade do ar (NO_x) medido numa estação de monitoramento da CETESB.

O NO₂ tem papel central na química troposférica além de possuir impactos comprovados na saúde das pessoas, entretanto, a sua fração nos óxidos de Nitrogênio (NO + NO₂) diretamente emitida pelos automóveis é pequena, principalmente nas emissões dos veículos Otto a gasolina, a qual foi estimada em 2% (YAO et.al. 2005). Em presença de radiação solar, há formação do ozônio (O₃) que rapidamente oxida o NO emitido pelo escapamento em NO₂, ou seja, em ambiente aberto a relação NO₂/NO_x é alterada pela participação do ozônio. Optou-se então por avaliar as concentrações ambientais de NO_x para verificação do seu comportamento ao longo dos anos e também pelo acompanhamento das concentrações do ozônio atmosférico no mesmo período.

Emissão de NO: Veículos Flex versus movidos a gasool

Constata-se a partir da Figura 41 que os maiores níveis de emissão de NO foram observados na frota de veículos movidos somente a gasool e dentre estes os mais novos (ano-modelo de 2005 em diante) foram os que mais emitiram. Quanto à frota de veículos Flex, as maiores emissões foram observadas para os veículos mais antigos, mas ficaram abaixo daquelas observadas nos veículos novos movidos exclusivamente a gasool.

Figura 41 – Comportamento das emissões de NO em função da VSP e Ano-Modelo

Fonte: Elaborada pelo autor

Fica demonstrado que não foram os veículos Flex os responsáveis pelas elevadas emissões de NO, principalmente para os veículos ano-modelo de 2005 a 2010. A Figura 40 já apontava para esse fato.

Influência do VSP nas emissões de NO

Na Figura 42 são apresentadas as curvas de iso-concentração de emissão de NO segundo o valor da VSP e o ano-modelo do veículo. Ela deixa claro que as maiores emissões de NO foram observadas praticamente em toda faixa de variação da potência específica do veículo, evidência ainda que os maiores valores foram observados para os veículos mais novos, e como constatado anteriormente, movidos a gasool. Pode-se então concluir que a VSP não determinou o comportamento das emissões de NO dos veículos. A Figura 23 mostrou que não existiram singularidades na distribuição da VSP, expondo seu perfil unimodal.

Figura 42 – Comportamento das emissões de NO em função da VSP e Ano-Modelo

Fonte: Elaborada pelo autor

Emissão de CO_2 em função da VSP e ano-modelo dos veículos

Na Figura 43 é apresentado o comportamento das emissões de CO_2 em função do VSP e Ano-modelo do veículo emissor.

Figura 43 – Comportamento das emissões de CO₂ em função da VSP e Ano-modelo dos veículos

Fonte: Elaborada pelo autor

Pode-se observar que para os veículos mais novos as emissões de CO₂ ficam na faixa de 14,5% a 15,5%. Esse comportamento também não contribui para compreensão das elevadas emissões de NO por parte dos veículos a gasool.

Percentual de Etanol na Gasolina

A evolução do percentual de etanol na gasolina é apresentada na Tabela 20, nela pode-se observar que em 10/11/2006 o percentual subiu de 20 para 23% e em 27/06/2007 subiu novamente para 25%, permanecendo com este percentual até 01/02/2010 quando voltou para 20%, mas em 02/05/2010 retornou a 25%.

Tabela 20 - Cronologia da mistura carburante automotiva no Brasil

Legislação Aplicável		% Etanol	Vigência
Número	Publicação		
Lei No. 10464	22/05/2002	20 a 25%	27/05/2002
Portaria MAPA N°.266	21/06/2002	25%	01/07/2002
Portaria MAPA N°.17	22/01/2003	20%	01/02/2003
Portaria MAPA N°.554	27/05/2003	25%	01/06/2003
Portaria MAPA N°.429	13/10/2005	20%	14/10/2005
Portaria MAPA N°.51	22/02/2006	20%	01/03/2006
Portaria MAPA N°.278	10/11/2006	23%	20/11/2006
Portaria MAPA N°.143	27/06/2007	25%	01/07/2007
Portaria MAPA N°.7	11/01/2010	20%	01/02/2010
		25%	02/05/2010
Portaria MAPA N°.678	31/08/2011	20%	01/10/2011
Portaria MAPA N°.105	01/02/2013	25%	01/05/2013
Lei N°. 13033	25/09/2014	18 a 27,5%	16/02/2015
Portaria MAPA N°.75	05/03/2015	27%	16/03/2015

Fonte: CETESB (2015)

O aumento do percentual de etanol na gasolina passou de 20% para 25% em 2007, permanecendo com esse valor durante as medições feitas com o RSD, o que sugere que possivelmente o aumento do percentual de etanol na mistura pode ter impactado nas emissões de NO_x dos veículos movidos exclusivamente a gasolina. Estudos adicionais são necessários para verificação desta hipótese.

Evolução das concentrações ambientais de NO_x na Cidade de São Paulo

Para verificar se houve impacto na qualidade do ar devido às elevadas emissões de NO, foi escolhida a estação de monitoramento da qualidade do ar da CETESB situada no Parque do Ibirapuera.

Essa estação não fica próxima das principais vias da região, as quais possuem tráfego predominante de veículos leves do ciclo Otto. Ela também possui informações meteorológicas o que nos possibilita uma análise mais profunda dos dados de monitoramento. A Figura 44 apresenta o comportamento das concentrações horárias de NO_x observadas no período de 01/01/2000 a 31/12/2015, ou seja, são 16 anos de dados horários.

Figura 44 – Evolução das concentrações médias de NO_x [µg/m³] no Parque do Ibirapuera

Fonte: Elaborada pelo autor

Infelizmente ficaram ausentes os dados no período de inverno de 2005 e 2006, quando se observam os picos de concentrações desse poluente (ver Figura 44), mas em 2007 fica claro o impacto significativo nas concentrações de NO_x.

Foram verificados picos de concentração no período da manhã e à noite. Durante o dia há forte queda nas concentrações do NO_x devido a sua participação na formação do ozônio.

Na Figura 45 é apresentado o comportamento normatizado das concentrações ambientais de NO_x no Parque do Ibirapuera. Ela apresenta o comportamento médio das concentrações médias horárias de NO_x dos dias da semana, o perfil horário das concentrações, o perfil das médias mensais de NO_x e o perfil das médias dos dias da semana. Todos os perfis foram levantados com base nos 16 anos de dados em base horária.

Figura 45 – Comportamento Normalizado do NO_x no Parque do Ibirapuera

Fonte: Elaborada pelo autor

O comportamento das concentrações de NO_x possui sazonalidade diária nos dias da semana e diferenciado no final de semana (sábado e domingo). Apontando ainda que os valores máximos ocorrem no Inverno. Esses perfis foram elaborados com base em 16 anos de observações de dados neste local.

A Figura 46 deixa claro este perfil constatado. Nela fica evidente que o comportamento das concentrações de NO_x no Ibirapuera está associado às emissões veiculares, estando presentes durante os dias úteis da semana e redução no período noturno e finais de semana, seguindo o mesmo comportamento da frota de veículos circulantes.

Figura 46 – Rosas de concentrações de NO_x segundo o período do dia e dia útil ou final de semana

Fonte: Elaborada pelo autor

Na Figura 47 é apresentado o ajuste de tendência utilizando a metodologia de Mann-Kendall (HAMED, 1998) para o comportamento das concentrações de NO_x no Ibirapuera.

Figura 47 – Análise de tendência usando metodologia Mann-Kendall para NO_x no Parque do Ibirapuera – 2000 a 2015

Fonte: Elaborada pelo autor

Foi constatada tendência significativa de decréscimo das concentrações ambientais de NO_x, a taxa observada foi de **-0,84 µg/m³** por ano com intervalo de confiança de **[-1,01 ---- -0,69]**. Constatou-se ainda que o crescimento das emissões de NO detectado através do SR foi igualmente identificado nos dados de qualidade do ar. Em 2009 houve uma reversão no comportamento e as concentrações de NO_x voltaram a decrescer.

A análise mostrou que o problema que ocorreu nas emissões veiculares de NO teve impacto transitório nas concentrações ambientais de NO_x, veja que a partir de 2009 as concentrações deixaram de apresentar fortes picos no inverno e recuperaram a tendência de decréscimo que vinha sendo observada até 2005. Mas, como o NO_x é precursor na formação de ozônio, foi avaliado o comportamento do O₃ para verificar se o problema das emissões não aparecem nas concentrações de O₃.

A Figura 48 mostra o comportamento oposto entre o O₃ e o NO_x na atmosfera.

Figura 48 - Comportamento Conjunto Normalizado das concentrações ambientais de NO_x , O_3 e CO no Parque do Ibirapuera – 2000 a 2015

Fonte: Elaborada pelo autor

Na Figura 48 pode-se constatar que o comportamento é complementar do NO_x em relação do O_3 . As emissões de NO_x no congestionamento do período da manhã levam à formação dos picos de O_3 por volta das 13:00hs.

Outro fato importante apresentado na Figura 48 é que o comportamento das concentrações de NO_x é similar ao das concentrações de CO, basicamente devido à emissão dos veículos leves do ciclo Otto (veja na Figura 1 que somente 6,2% do CO emitido provém dos veículos a diesel).

Ozônio no Ibirapuera

A evolução das concentrações atmosféricas de ozônio no Parque do Ibirapuera está apresentada na Figura 49.

Figura 49 – Evolução das concentrações médias de O_3 [$\mu g/m^3$] no Parque do Ibirapuera – 2000 a 2015

Fonte: Elaborada pelo autor

A Figura 49 apresenta o comportamento das concentrações médias horárias de Ozônio atmosférico. Ela apresenta 16 anos de dados horários. Comparando com a Figura 47, que apresentou os dados de NO_x , foi observado comportamento oposto desses poluentes.

Como o comportamento do O_3 é sazonal, são observados valores elevados nos períodos de maior radiação, são apresentadas na Figura 50 as *Rosas de concentração* de O_3 em função das estações do ano.

Figura 50 – Rosas de Concentração de Ozônio em função das estações do ano no Parque do Ibirapuera – Período de 2000 a 2015

Fonte: Elaborada pelo autor

Como se pode observar na Figura 50, na Primavera se observa as maiores concentrações de ozônio no Parque do Ibirapuera. No Verão igualmente se tem valores elevados, caindo drasticamente no Outono e no Inverno quando os índices de radiação solar são menores.

Na Figura 51 é apresentado o comportamento das concentrações atmosféricas do ozônio e ele foi similar em todos os dias da semana, esse fato fica evidenciado na Figura 51 que apresenta as Rosas de concentrações de O_3 para os dias úteis e finais de semana separadamente. Apresenta ainda a diferença nas concentrações observadas no período noturno devido à ausência de radiação solar.

Figura 51 – Rosas de Concentrações de O_3 em função de ser dia útil ou final de semana e período diurno/noturno.

Fonte: Elaborada pelo autor

Como se pode observar, o perfil de concentrações do ozônio nos finais de semana é próximo e chega a ser superior àquele observado nos dias úteis da semana. Como era de se esperar, à noite os níveis são mínimos e independem do dia da semana. Como não há formação de ozônio sem a presença de luz solar, as concentrações de NO_x aumentam à noite, como visto na Figura 48.

Na Figura 52 é apresentado o resultado do ajuste de tendência utilizando a metodologia Mann-Kendall para o comportamento das concentrações de O_3 no Parque do Ibirapuera.

Figura 52 – Análise de tendência usando metodologia Mann-Kendall para o O_3 no Parque do Ibirapuera – 2000 a 2015

Fonte: Elaborada pelo autor

Foi constatada tendência significativa de crescimento das concentrações ambientais de ozônio, a taxa de crescimento observada foi de **+0,6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$** por ano com intervalo de confiança de **[0,35 ---- 0,88]**.

Resposta detectada pelo RSD na Europa

Na Figura 53 é apresentada a resposta detectada pelo SR às fases de controle de emissão dos veículos movidos a gasolina - ***Euro class***.

É possível verificar que o problema com as elevadas emissões de NO não foi observado na Europa. Todos os poluentes responderam positivamente reduzindo as emissões com a evolução das fases do programa de controle europeu.

Figura 53 – Resposta detectada pelo RSD na Europa para veículos a gasolina

Fonte: CARSLAW (2013b)

Esse resultado aponta para o fato do problema de emissões elevadas de NO_x em veículos movidos a gasool no Brasil é devido a alguma característica local, o aumento do percentual de etanol na gasolina é uma possibilidade que precisaria ser melhor estudada.

Evolução dos Fatores Médios de Emissão de NO_x pelos automóveis a gasool

Na Figura 54 é apresentada a evolução dos Fatores Médios de Emissão (ponderados pelas vendas), em g/Km, dos automóveis movidos somente a gasool. Nela se constata que o comportamento das emissões de NO_x dos veículos homologados vem decrescendo desde 1994.

Figura 54 – Evolução dos Fatores Médios de Emissão de NO_x – automóveis a gasool

Fonte: Elaborado pelo autor a partir dos dados de CETESB (2013a)

A Figura 54 deixa claro o comportamento esperado para as emissões de NO_x nas condições de uso dos veículos movidos a gasolina C.

Os padrões de emissão europeus, por fase do programa e poluentes, estão apresentados no Anexo D.

6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Conclusões

- ✓ Controlando as características e condições dos locais escolhidos para efetuar as medições utilizando o RSD, de tal forma que seja garantido que a VSP não interfira significativamente nas emissões, constatamos que somente as fases do Proconve precisam ser controladas para determinação dos valores indicativos de veículos com elevadas emissões de poluentes. Os parâmetros de controle são: aceleração variando no intervalo de $-2 \text{ (Km/h).s}^{-1} < a < +3,5 \text{ (Km/h).s}^{-1}$, a velocidade variando no intervalo de $15 \text{ km/h} < v < 50 \text{ km/h}$ e a inclinação da pista precisa ser positiva e com valor entre 3° e 8° . Deve-se observar que acelerações negativas são admitidas com inclinação entre 5° e 8° ;
- ✓ VSP não apresentou impacto significativo nas emissões dos poluentes CO, HC e NO;
- ✓ As emissões de CO e HC foram impactadas pelas tecnologias empregadas nos veículos das Fases L3, L4 e L5 do Proconve. Para o NO, não foi observado impacto significativo devido às mesmas fases;
- ✓ Não foi constatada diferença significativa nas emissões de CO e HC dos veículos flex daqueles movidos exclusivamente a gasool. Para ambos os poluentes as emissões decresceram segundo as fases do Proconve;
- ✓ Foi constatado comportamento diferenciado dos veículos a gasolina nas emissões de NO comparativamente aos veículos flex. As emissões observadas em ambos não acompanharam o decréscimo estabelecido pelo Proconve. Um possível fator que pode estar associado a esse aumento nas emissões de NO para os veículos mais novos é o percentual de etanol na gasolina que passou de 20% para 25% e permanecendo com esse percentual até Fevereiro de 2010. Essa é uma hipótese que precisa ser estudada;
- ✓ O método EM identificou com sucesso as duas distribuições, uma dos veículos normais e outra daqueles com elevadas emissões que se misturam nas vias. O método foi aplicado segundo as fases do Proconve e poluentes CO, HC e NO o que possibilitou identificar o percentil 98% da distribuição dos

veículos com emissões normais para seu emprego como valor limite para identificação dos veículos com elevada emissão [*high emitters*];

- ✓ Considerando o procedimento em vigor para o Programa de I/M na cidade de São Paulo, o qual isenta de inspeções uma parcela substancial da frota circulante, a avaliação dos veículos em circulação usando o RSD, visando identificar aqueles veículos com emissões anormais para sua fase do Proconve, certamente produzirá redução significativa nas emissões de poluentes. Esses veículos identificados como *High Emitters* teriam seus proprietários notificados a comparecer no centro de inspeções para uma avaliação completa estabelecida pelo Programa I/M implantado. Um programa de avaliação contínua da frota usando o RSD pode fundamentar, inclusive, uma proposta para alteração do atual procedimento caso demonstre que a isenção por três anos é muito leniente e que a frequência de inspeção a cada dois anos pode não ser adequada, isso sem subjetividade na avaliação;
- ✓ O método proposto, baseado no EM, possibilita outro uso potencial para a identificação dos veículos com baixas emissões de poluentes [*low emitters*] e recomendar sua liberação de uma inspeção mais completa. Um percentil adequado atrelado a um número de passagens pelo RSD respaldaria essa decisão. A taxa cobrada pela inspeção neste caso poderia ser reduzida pois seu custo é inferior.

Recomendações para futuros trabalhos

É recomendável que sejam desenvolvidos estudos para atendimento das seguintes demandas:

- a) metodologia de cálculo dos fatores de emissão dos poluentes, em g/km, para veículos movidos a gasool, e veículos flex movidos com gasolina C (E25) e com álcool (E100);
- b) pesquisar a influência do teor de etanol adicionado à gasolina nos Fatores de emissão dos poluentes emitidos (g/km);
- c) elaboração de procedimento para identificação dos veículos com emissões muito baixas de tal sorte que possam ser liberados de uma inspeção mais complexa em programas de I/M;

d) emprego do RSD para medição de outros poluentes emitidos pelos veículos automotores leves do ciclo Otto, tais como NH_3 , MP, SO_2 .

7. REFERÊNCIAS

ASIAN DEVELOPMENT BANK (ADB) . Policy Guidelines for Reducing Vehicle Emissions in Asia, Publication Stock No. 110202, Manila, 57p. (2003)

AUSTIN T, BURNETTE AD, KLAUSMEIER R, SLOTT B. **Review of Literature on Remote Sensing Devices**. (2004) California 71p. Disponível em <http://www.arb.ca.gov/msprog/smogcheck/may07/litrev.pdf> . Acessada em 22/01/2015

BALES MP. **Proposta metodológica para o desenvolvimento de índice que reflita o impacto das emissões de poluentes de veículos do ciclo Otto na qualidade do ar da Região Metropolitana de São Paulo**. (2015) 80p. Dissertação de Mestrado. Faculdade de Saúde Pública – USP. São Paulo.

BENAGLIA, T. et al. mixtools: An R Package for Analyzing Mixture Models. **Journal of Statistical Software**, [S.l.], v. 32, Issue 6, p. 1 - 29, oct. 2009b. ISSN 1548-7660. Available at: <<https://www.jstatsoft.org/v032/i06>>. Date accessed: 03 apr. 2018. doi:<http://dx.doi.org/10.18637/jss.v032.i06>.

BENAGLIA, T, CHAUVEAU, D, and HUNTER, DR (2009a), An EM-like algorithm for semi- and non-parametric estimation in multivariate mixtures, *Journal of Computational and Graphical Statistics*, 18, 505-526.

BISHOP AG, SCHUCHMANN BG, STEDMAN DH, LAWSON DR. Emission Changes Resulting from the San Pedro Bay, California Ports Truck Retirement Program. **Environ. Sci. Technol.** **46**, 551-558. (2012)

BISHOP GA, STEDMAN DH. **Remote Measurements of On-Road Emissions from Heavy-Duty Diesel Vehicles in California, Year 5, 2012**. 35p. (2013) Disponível em http://www.feat.biochem.du.edu/assets/databases/Cal/CA_HDDV_final_report_2012_NREL_version.pdf . Acessada em 17/01/2015.

BISHOP GA, STEDMAN DH. **On-road remote sensing of automobile emissions in the Tulsa Area: Fall 2013**. CRC Report No. E-106, 39p. (2014) Disponível em <http://www.crcao.com/reports/recentstudies2014/E-106%20Tulsa%202013/Tulsa%202013%20Final%20report%20v3.pdf> . Acessada em 05/02/2015.

BISHOP GA, BURGARD DA, SETDMAN DH. **On-road Remote Sensing of Automobile Emissions in the Omaha Area: Year 2**, September. CRC Report, EPA Contract No.68-C-02-048. 28p. (2005)

BRAGA ALF, et al. Health effects of air pollution exposure on children and adolescents in Sao Paulo, Brazil. **Pediatr Pulmonol.** **31**(2):106-13. (2001)

BRAGA, ALF, et al. Air Pollution and Pediatric Respiratory Hospital Admissions in São Paulo, Brazil, in **J. Environ. Med.** **1**, pp. 95-102. (1999)

BRANCO, GM; et.al. Critério de Avaliação da Eficácia do Programa de Inspeção Veicular. In: **XX Simpósio Internacional de Engenharia Automotiva - SIMEA**, São Paulo. (2012a)

BRANCO, GM; SZWARC, A; BRANCO, FC. **Programa ambiental de Inspeção Veicular – Princípios, fundamentos e procedimentos de teste**. Ed. Edgard Blucher Ltda, São Paulo, 68p. (2012b)

BRANCO, GM; BRANCO, FC; SZWARC, A. **Relatório de Avaliação do Programa I/M: descritivas e resultados de veículos com motor ciclo Otto em 2011**. 42p. (2012c) Disponível em http://www.controlar.com.br/Arquivos/Imprensa/Release/Rel2012_03_Avaliacao%20de%20Veiculos%20OTTO_Descritivas%20Resultados%20e%20Impactobef5ba3f0eb241838108f61d53b30cc6.pdf; acessado em 11/10/2013.

BRANCO, GM; et.al. Correlação de Resultados de Inspeção em Marcha Lenta e Medições por Sensoriamento Remoto,. In: **XX Simpósio Internacional de Engenharia Automotiva – SIMEA**, São Paulo. (2012d)

BRAGA A, et.al. Poluição atmosférica e saúde humana. **Revista USP**, São Paulo, n. 51, p. 58-71, set. (2001) Disponível em: <http://www.revistas.usp.br/revusp/article/view/35099/37838> . Acessada em 10/01/2015.

BUCKLAND ST, BURNHAM KP and AUGUSTIN NH, Model selection: an integral part of inference. **Biometrics** **53**, 603–618. (1997)

BURGARD DA, et.al. Spectroscopy applied to on-road mobile source emissions. **Applied Spectroscopy.** **60**,135A. (2006a)

C40 CITIES CLIMATE LEADERSHIP GROUP. Disponível em <http://www.c40.org/events/air-volution>, acessada em 28/03/2017.

ENVIROTEST CANADA . **Remote Sensing Device Trial for Monitoring Heavy-Duty Vehicle Emissions**. 139p. Report prepared by Envirotec Canada. (2013) Disponível em http://www.metrovancouver.org/services/air-quality/AirQualityPublications/2013_RSD_HDV_Study.pdf . Acessada em 18/01/2015.

CANÇADO JED; et.al. Repercussões Clínicas da exposição à poluição atmosférica, **J. bras. pneumol.** **32** (2), São Paulo, May (2006).

CARSLAW DC, et.al. The importance of high vehicle power for passenger car emissions. **Atmospheric Environment**, **68** 8-16. (2013).

CARSLAW DC, TYLER GR **Remote sensing of NO₂ exhaust emission from road vehicles**. London. Report produced by King's College London & Newcastle University, 97p. (2013b)

CETESB - COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Emissões veiculares no estado de São Paulo 2012** [recurso eletrônico] /CETESB ; coordenação técnica Marcelo Pereira Bales; elaboração Antônio de Castro Bruni [et al.]. São Paulo: CETESB, (2013a). 108 p. : il. color. (Série Relatórios / CETESB, ISSN 0103-4103)

CETESB - COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Plano de Controle de Poluição Veicular do Estado de São Paulo – 2011 a 2013**.

Disponível em: <<http://www.cetesb.sp.gov.br/userfiles/file/noticias/pcpv.pdf>>
[Acessada em 09/10/2013](#).

CETESB - COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO. Dados horários de Qualidade do Ar em São Paulo. <http://ar.cetesb.sp.gov.br/qualar/>. acessada em 2016.

CHALMERS I, ENKIN MW and KEIRSE MJNC (eds) **Effective care in pregnancy and childbirth** (volumes 1 and 2), Oxford University Press, 1990, 1300 pages.

CHAN TL, et.al. On-road remote sensing of petrol vehicle emissions measurement and emission factors estimation in Hong Kong. **Atmospheric Environment**, **38** (2004) 2055-2066.

CITA **Study on the Future Options for Roadworthiness Enforcement in the European Union** – AUTOFORA – WP 330 – Actual situation of Remote Sensing. (2007)

COMEAP - COMMITTEE ON THE MEDICAL EFFECTS OF AIR POLLUTANTS (UK). **The Health Effects of Air Pollutants**. (2013). Disponível em <https://www.gov.uk/government/collections/comeap-reports>. Acessada em 22 March 2014

CONTROLAR. **Relatório Anual das Inspeções veiculares do exercício de 2011**. (2012) Disponível em: <http://www1.controlar.com.br/pdf/RelatorioAnualControlar2011.pdf> Acessada em 09/10/2013.

CORDEIRO MP, Medición Remota de Emisiones del Tráfico: Tecnología RSD.in Workshop Tecnologías y Sistemas para la Medición de Emisiones. Madrid 23/02/2016.(2016) Disponível em <http://www.sernauto.es/es/workshop-medicion-emisiones/finish/202-workshop-medicion-emisiones-230216/1194-14medicionremotadelasemisionesdetraficociemat>, acessada em 07/01/2018.

CULS - CORNELL UNIVERSITY LAW SCHOOL (2014). Disponível em: <http://www.law.cornell.edu/uscode/text/42/7408>, acessada em 21/03/2017.

DAVIS, LW. The effect of driving restrictions on air quality in Mexico City. *Journal of Political Economy* **116**, 38–81. (2008)

DE ANDRÉ, PA - **Redução estimada da emissão de poluentes pelo programa de inspeção veicular em veículos diesel e seu impacto em saúde** – Oficina sobre Meio ambiente urbano e uso da ciência na definição de políticas públicas – Faculdade de Medicina da USP / Instituto Nacional de Análise Integrada de Risco Ambiental (INAIRA – CNPq/FAPESP) – 11/junho/2012.

DIAB NY., ZUNCKEL RD., HAYES MET. Introduction of local air quality management in South Africa: Overview and challenges. **Environmental Science&Policy** 17,62–71. (2012)

ESPANHA, Ministério da Agricultura, Alimentação e Meio Ambiente, **Plan Nacional de Calidad del Aire y Protección de la Atmósfera 2013-2016**, 2013, 214p. Disponível em: http://www.magrama.gob.es/imagenes/es/PLAN%20AIRE%202013-2016_tcm7-271018.pdf Acessada em 12/10/2013.

FISHER GW, BLUETT JG, KUSCHEL GI. **On-Road Remote Sensing of Vehicle Emissions in the Auckland Region**. Prepared or Auckland Regional Council. Auckland Regional Council Technical Publication No. 198. 94p. (2003).

FREY HC et.al. “Modeling Mobile Source Emissions Based Upon In-Use and Second-by-Second Data: Development of Conceptual Approaches for EPA’s New MOVES Model,” *Proceedings, Annual Meeting of the Air & Waste Management Association*, Pittsburgh, PA, June (2003).

GALA F. Caracterización de las emisiones Del tráfico en Granollers. Catalonia. Technet. (2012) Disponível em http://www.granollers.cat/sites/default/files/antiques_d6/pagina/2012/06/20120531_Resumen%20Ejecutivo_FG.pdf . Acessada em 25/01/2015.

GÓMES JAA, et.al.. **Mobile Source Emission Estimates using Remote Sensing Data from Mexican Cities**. 18p. (2009) Disponível em <http://www.epa.gov/ttnchie1/conference/ei18/session6/aguiar.pdf> .Acessada em 16/01/2015.

GULIA S, et.al. Urban air management – A review. **Atmospheric Pollution Research** 6 (2015) 286-304. (2015)

HAMED KH, RAO AR A modified Mann-Kendall trend test for autocorrelated data. **Journal of Hidrology** (204) Issues 1-4. Pp182-196. (1998)

HAO JM, WANG LT Improving urban air quality in China: Beijing case study. **Journal of the Air&Waste Management Association** 55, 1298–1305. (2005)

HERBER, P **Carro elétrico: vantagens e equívocos**. INEE. (2012) Disponível em: <https://www.ambienteenergia.com.br/index.php/2012/02/carro-eletrico-vantagens-e-equivocos/17145> Acessada em 05/02/2014.

HITCHCOCK G et.al. **Air quality and Road transport – Impacts and solutions**, London, UK, 139p. (2014)

JAZCILEVICH A.D et.al. An evaluation of the hybrid car technology for the Mexico Mega City. **Journal of Power Sources** **196**, 5704– 5718, (2011)

JIMÉNEZ-PALACIOS JL, et.al. Remote sensing of NO and NO₂ emissions from heavy-duty diesel trucks using tunable diode lasers. **Environmental Science & Technology**; **34**(12):2380-2387. (2000)

JIMÉNEZ-PALACIOS JL, **Understanding and quantifying motor vehicle emissions with vehicle specific power and TILDAS remote sensing**, 1999, 360p. MIT PhD Thesis. Disponível em:
https://el.trc.gov.om/htmlroot/ENGG/EReferences/Common/Understanding%20and%20quantifying%20motor%20vehicle%20emissions%20with%20vehicle%20specific%20power%20and%20TILDAS%20remote%20sensing_OCWER006176.html
 . Acessada em 12/10/2013.

JORNAL DA TARDE, 06/10/2010, Caderno Cidades, *Oficinas alugam peças para carros passarem na inspeção veicular*. <http://blogs.estadao.com.br/jt-cidades/oficinas-alugam-pecas-para-carros-passarem-na-inspecao-veicular/>
 Acessada em 12/10/2013.

KLEEFELD JB, CHEN Y. New emission deterioration rates for gasoline cars – Results from long-term measurements. **Atmospheric Environment**, **101** (2015) 58-64.

KUHNS HD, et al. Remote sensing of PM, NO, CO and HC emission factors for on-road gasoline and diesel engine vehicles in Las Vegas, NV. **Science of The Total Environment** **322** (1-3):123-137. (2004).

MARTINS LC, et.al. Air pollution and emergency room visits due to chronic lower respiratory diseases in the elderly: an ecological time-series study in Sao Paulo, Brazil. **J Occup Environ Med**. **44**(7):622-7. (2002)

MARQUES DO, et.al. Combustion assessment of an ethanol/gasoline flex-fuel engine. **J Braz. Soc. Mech. Sci. Eng.** (2016) DOI 10.1007/s40430-016-0609-4.

MEHEL A, MURZYN F Effect of air velocity on nanoparticles dispersion in the wake of a vehicle model: wind tunnel experiments. **Atmospheric Pollution Research** **(6)**: 612-617. (2015).

MOLINA, L.T., et.al. An overview of the MILAGRO 2006 Campaign: Mexico City emissions and their transport and transformation. **Atmospheric Chemistry and Physics** **10**, 8697–8760. (2010)

MOLINA, L.T.,et.al. Air Quality, Weather and Climate in Mexico City. **World Meteorological Organization (WMO) Bulletin** **58**,48 pages. (2009)

MOLINA, L.T., MOLINA, M.J. **Air Quality in the Mexico Megacity: An Integrated Assessment**, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands, pp.141–145. (2002)

NEGRISOLI J, NASCIMENTO LFC. Poluentes atmosféricos e interações por pneumonia em crianças. *Rev Paul Pediatr* 2013;**31**(4):501-6.

PHILIPPINES, Asia Development Bank, **Reducing vehicle emissions in Asia**, (2003). Asia Development Bank. Manila.

PMSP – PREFEITURA DO MUNICÍPIO DE SÃO PAULO. Lei 14717 de 17/04/2008. Dispõe sobre a criação do Programa de Inspeção e Manutenção de Veículos em Uso. Diário Oficial da Cidade de São Paulo, SP. Disponível no sítio http://www3.prefeitura.sp.gov.br/cadlem/secretarias/negocios_juridicos/cadlem/integra.asp?alt=18042008L%20147170000 acessada em 25/05/2017.

RIGBY RA and STASINOPOULOS DM Generalized additive models for location, scale and shape,(with discussion), **Appl. Statist.**, **54**, part 3, pp 507-554. (2005).

SÁ RAB, et.al. Atributos e benefícios da nova gasolina S₅₀. In: **XX Simpósio Internacional de Engenharia Automotiva** - SIMEA , São Paulo, (2012).

SEADE – FUNDAÇÃO SISTEMA ESTADUAL DE ANÁLISE DE DADOS. **SP Demográfico – Resenha de Estatísticas Vitais do Estado de São Paulo**, 13 (1) – Janeiro 2013.

SJÖDIN A, JERKSJÖ M. **Evaluation of European Road Transport Emission Models Against On-Road Emission Data as Measured by Optical Remote Sensing**. 17^o International Conference on Transport and Air Pollution, Graz, Austria. (2008) Disponível em: http://www20.vv.se/fud-resultat/publikationer_000601_000700/publikation_000620/evaluation%20of%20european%20road%20transport%20emission.pdf . Acessada em 16/01/2015.

SLOTT RS. **Remote sensing in four cities to determine the changes in on-road vehicle fleet emissions over time**. CRC Report No. E-23. (2007) Disponível em: <http://www.crcao.org/reports/recentstudies2008/E-23%20Final%20Report/E-23%20Slott%20FINAL%20revised%207%2009DEC2007.pdf> . Acessado em 28/01/2015.

SLY PD, et al. Health Consequences of Environmental Exposures: Causal Thinking in Global Environmental Epidemiology. **Annals of Global Health.**; 82(1):3-9. (2016)

SÃO PAULO (Estado). Coordenadoria de Planejamento Ambiental – SMA/CPLA, **Relatório de Qualidade Ambiental no Estado de São Paulo – 2013**, (2014). Disponível em: www.ambiente.sp.gov.br/cpla/.../relatorio-de-qualidade-ambiental-2013/ . Acessada em 10/01/2015.

SRI LANKA – MINISTRY OF TRANSPORT. **Remote Sensing of Vehicle Emissions in Sri Lanka**. Publicado pela USAID/US-AEP. 52p. (2005).

ST. DENIS MJ, BUDD R. **Connecticut Vehicle Inspection Program** – 2014. On-road Vehicle Survey, February 2015, Connecticut, 45p. (2015).

STEDMAN DH, BISHOP GA, PEDDLE A, **On-Road Motor Vehicle Emissions including NH₃, SO₂ and NO₂**. California, (2009), 91p.

SÃO PAULO (Município). Secretaria do Verde e do Meio Ambiente – SVMA. Portaria 009/2013 Publicada no Diário Oficial do Município em 29/01/2013.

Disponível em:

http://www.controlar.com.br/pdf/Portaria_009_SVMA_2013_Regras_2013.pdf .

Acessada em 31/01/2013.

TATE J. **Vehicle emission measurement and analysis** – Cambridge City Council. University of Leeds, Institute for Transport Studies Report. 65p. (2013)

Disponível em

https://www.cambridge.gov.uk/sites/www.cambridge.gov.uk/files/documents/Cam_VEMS_ProjectReport_v1.0.pdf . Acessada em 30/01/2015.

TOLEDO GIFM, NARDOCCI AC Traffic related air pollution and population health: A review about São Paulo (SP), Brazil. **Revista Brasileira de Epidemiologia** 14(3):445-454. (2011).

WHO – WORLD HEALTH ORGANIZATION. **Don't pollute my future!** The impact of the environment on children's health. Geneva, Switzerland, 36p. (2017). Disponível em (<http://www.who.int/phe/en/>), acessada em 18/3/2017.

WHO – WORLD HEALTH ORGANIZATION. **Global Health Observatory (GHO) data: Causes of child mortality** [website]. Geneva: World Health Organization; (2016a) Disponível em (http://www.who.int/gho/child_health/mortality/causes/en/), acessada em 17/3/2017).

WHO – WORLD HEALTH ORGANIZATION. **Ambient air pollution: A global assessment of exposure and burden of disease**. Geneva: World Health Organization. (2016b).

WHO – WORLD HEALTH ORGANIZATION. **Review of evidence on health aspects of air pollution** – REVIHAAP Project. European Centre for Environment and Health, Bonn. 302p. (2013)

YAO, X et.al. The use of tunnel concentration profile data to determine the ratio of NO₂/NO_x directly emitted from vehicles. **Atmos. Chem. Phys. Discuss.** (5),12723-12740. (2005). Disponível em <https://www.atmos-chem-phys-discuss.net/acpd-2005-0344/> acessada em 20/11/2017.

ZHONG,LJ. et.al. Science policy interplay: Air quality management in the Pearl River Delta region and Hong Kong. **Atmospheric Environment** 76, 3–10. (2013)

ZHOU Y et. al. The impact of transportation control measures on emission reductions during the 2008 Olympic Games in Beijing, China. **Atmospheric Environment** 44, 285–293. (2010).

ANEXOS

Anexo A – Ofícios solicitando os dados

Ofício n.º

São Paulo, 13 de janeiro de 2014.

Vossa Senhoria,
Ricardo Teixeira
Secretário do Verde e do Meio Ambiente da Cidade de São Paulo
Rua Paraíso, 387.
São Paulo - Capital

Assunto: Solicitação de dados para finalidade de tese de doutorado

Senhor Secretário,

Solicitamos de Vossa Senhoria o especial obséquio de autorizar a empresa Controlar S/A, responsável pelas inspeções veiculares na Cidade de São Paulo, o fornecimento dos dados das inspeções dos veículos do ciclo Otto (automóveis e utilitários), referentes aos exercícios de 2009 e 2010.

Nosso pedido se fundamenta no fato de que foi aprovado pela Faculdade de Saúde Pública da Universidade de São Paulo um projeto de tese de doutorado que tem por objetivo estabelecer critérios para identificação de veículos automotores leves do ciclo Otto com elevadas emissões de monóxido de carbono e/ou de hidrocarbonetos. Neste sentido, solicitamos a gentileza de nos fornecer esses dados para que o projeto seja levado a termo.

Salientamos que os referidos dados serão utilizados somente para a finalidade da tese, não serão utilizados em outros projetos para outras finalidades. Solicitamos que os dados confidenciais sejam excluídos os registros (tais como RENAVAM, CPF, endereço do proprietário). Para os demais dados, será mantida a confidencialidade e após seu uso serão destruídos todos os arquivos que contenham os mesmos, inclusive fisicamente. Constará na tese e nos artigos gerados a partir dela, a fonte dos dados e o nosso especial agradecimento.

Estamos certos que com esse trabalho se abrirá uma nova perspectiva para controlar as emissões veiculares. Será uma ferramenta a mais para fundamentar o controle das emissões de origem veicular.

Cordialmente,

Prof. Dr. João Vicente de Assunção
Chefe do Departamento de Saúde Ambiental
Faculdade de Saúde Pública da USP.

cc.: Marcos Brandão – Diretor Presidente da Controlar S/A.

Ofício n.º

São Paulo, 13 de janeiro de 2014.

Ilmo. Sr.
Ivan Pio de Azevedo
Diretor Presidente
BR Inspeções Ltda.
Av. Paulista, 2001.
São Paulo - Capital

Assunto: Solicitação de dados para finalidade de tese de doutorado

Senhor Presidente,

Foi aprovado pela Faculdade de Saúde Pública da Universidade de São Paulo um projeto de tese de doutorado intitulado: "*Crítérios para identificação de veículos automotores leves do ciclo Otto com elevadas emissões de monóxido de carbono ou de hidrocarbonetos utilizando sensoriamento remoto*" no qual serei o orientador. Esse projeto pretende trabalhar em paralelo com os dados do monitoramento feito através da tecnologia de sensoriamento remoto pela sua empresa, na Cidade de São Paulo, no período de 2008 a 2009 e os relativos às inspeções dos mesmos veículos dentro do programa de Inspeção e Manutenção executado pela empresa Controlar S/A, visando estabelecer critérios para a identificação dos veículos altamente poluidores (*high emitters*). Neste sentido, solicitamos a gentileza de nos fornecer esses dados para que o referido projeto seja levado a termo.

Salientamos que os dados serão utilizados somente para a finalidade da tese, não serão utilizados em outros projetos, para outras finalidades. Será mantida a confidencialidade dos mesmos e após seu uso, serão destruídos todos os arquivos que contenham os mesmos, inclusive fisicamente. Constará na tese e nos artigos gerados a partir dela, a fonte dos dados e o nosso especial agradecimento.

Estamos certos que com esse trabalho se abrirá uma nova perspectiva para controlar as emissões veiculares daqueles veículos que, de alguma maneira, tentar burlar a inspeção. Será uma ferramenta a mais para auxiliar controlar as emissões de origem veicular.

Cordialmente,

Prof. Dr. João Vicente de Assunção
Chefe do Departamento de Saúde Ambiental
Faculdade de Saúde Pública da USP.

Anexo B – Curriculum Vitae - Lattes

Antonio de Castro Bruni

Endereço para acessar este CV: <http://lattes.cnpq.br/4913570878926564>

Última atualização do currículo em 01/08/2017

Resumo informado pelo autor

Bacharel em Estatística pela USP, especialização em poluição do ar no Japão pelo International Center for Technology Transfer. Responsável pela adaptação do Valley Model para operar em Cubatão na Baixada Santista. cursou diversas disciplinas de pós-graduação em Estatística no IME-USP (1983 a 1985). De 1983 a 1985 atuou como Estatístico na Diretoria de Pesquisas, dando suporte estatístico na criação do PROCONVE, inclusive desenvolvendo o método para Coastdown. Deu suporte a todas as pesquisas desenvolvidas na cidade de Cubatão, inclusive as relativas a saúde. De 1986 a 1995 gerenciou o Setor de interpretação de dados, responsável pelo processamento e pela publicação dos dados de qualidade do ar da CETESB. De 1996 a 1997 gerenciou a Divisão de Sistemas e Banco de dados quando coordenou o desenvolvimento dos principais sistemas técnicos da CETESB. Coordenou o projeto de criação do site da CETESB. Participou ativamente do Projeto de renovação tecnológica de informática da CETESB, o qual mudou toda arquitetura de TI e capacitou mais de 1800 empregado para o emprego de microcomputador como ferramenta de trabalho. Em 1998 gerenciou a Divisão de Tecnologia Web sendo responsável pela criação da Intranet da CETESB Mestre em Saúde Pública pela FSP-USP. De 1999 a 2002 foi representante da SMA/CETESB no Grupo Setorial de Tecnologia da Informação e comunicação, ligado à Casa Civil. Coordenou o Projeto Y2K da CETESB. De 2003 a 2012 gerenciou o Setor de suporte tecnológico da CETESB. Ganhou dois prêmios em 2008 com o Projeto TI-Verde. Desde 2007 estuda a tecnologia para Big data. Desde então tornou-se estudioso da linguagem R. Doutorando em Saúde Pública pela USP a partir de 2014.

(Texto informado pelo autor)

Dados pessoais

Nome Antonio de Castro Bruni

Nascimento 30/03/1960 - São Paulo/SP - Brasil

CPF 064.062.668-89

Formação acadêmica/titulação

- 2014 Doutorado em Doutorado em Saúde Pública.
Faculdade de Saúde Pública - USP, FSP, Brasil
Orientador: Prof. Dr. João Vicente de Assunção
- 1995 - 2000 Mestrado em Mestrado em Saúde Pública.
Faculdade de Saúde Pública - USP, FSP, Brasil
Título: REDES NEURAIS: UMA NOVA PERSPECTIVA NA INTERPRETAÇÃO DE INFORMAÇÕES AMBIENTAIS, Ano de obtenção: 2000
Orientador: Prof. Dr. JOÃO VICENTE DE ASSUNÇÃO
- 1979 - 1982 Graduação em Bacharelado em Estatística.
Universidade de São Paulo, USP, São Paulo, Brasil

João Vicente de Assunção

Endereço para acessar este CV: <http://lattes.cnpq.br/4890053336024335>
Última atualização do currículo em 01/07/2017

Graduado em Engenharia Industrial Modalidade Química pela Faculdade de Engenharia Industrial FEI da PUCSP(1970), graduado em Engenharia Sanitária pela Universidade de São Paulo (1977), Master of Science em Hygiene/Air Pollution - University of Pittsburgh, EUA (1974), doutorado e livre-docência em Saúde Pública/Saúde Ambiental pela Universidade de São Paulo (1993 e 2006). Professor Assistente (1987-1993), Professor Doutor (1993-2006), Professor Associado (2006-2008) e Professor Titular (2008-2014) da Universidade de São Paulo, lecionando na Faculdade de Saúde Pública e na Escola Politécnica da USP. Atualmente é Professor Colaborador Sênior da USP. Tem experiência na área da Saúde Pública e Engenharia Ambiental/Engenharia Sanitária, com ênfase em poluição do Ar, atuando principalmente nos seguintes temas: Tecnologias de controle da poluição do ar, poluentes tóxicos, monitoramento do ar, ventilação industrial e gestão ambiental. Realiza estudos e pesquisas sobre substâncias tóxicas (poluentes orgânicos persistentes - POPs, em especial dioxinas e furanos, hidrocarbonetos policíclicos aromáticos - HPA, e metais). **(Texto informado pelo autor)**

Identificação

Nome	João Vicente de Assunção
Nome em citações bibliográficas	ASSUNÇÃO, J. V. de; ASSUNCAO, J.V.; Assuncao, Joao; de Assunção, João V.; Assunção, João Vicente de; De Assuncao, JV; ASSUNÇÃO, João Vicente de; Assunção, JV; DE ASSUNÇÃO, JOÃO VICENTE; ASSUNÇÃO, JOÃO VICENTE; De Assunção, João Vicente; DE ASSUNC'A'O, PHD, JOA'O VICENTE

Endereço

Endereço Profissional	Universidade de São Paulo, Faculdade de Saúde Pública, Departamento de Saúde Ambiental. Av. Dr. Arnaldo 715 Cerqueira César 01246-904 - São Paulo, SP - Brasil Telefone: (11) 30617885 Fax: (11) 30617732 URL da Homepage: http://www.fsp.usp.br
------------------------------	--

Anexo C – Locais de amostragem com o RSD

Localização dos pontos de avaliação dos veículos usando o RSD

Ponto	Localização	Bairro
1	Av. Afonso de Sampaio e Souza	Itaquera
2	Av. Água Fria	Tucuruvi
3	Av. Cel. Sezefredo Fagundes	Tremembé
4	Av. Corifeu de Azevedo Marques	Vila Lageado
5	Av. do Cursino	Saúde
6	Av. Emilia Marengo	Vila Regente Feijó
7	Av. Giovanni Gronchi	Paraisópolis
8	Av. Gov. Carvalho Pinto	Vila São Geraldo
9	Av. Guapira	Vila Mazzei
10	Av. Interlagos	Interlagos
11	Av. Itaberaba	Brasilândia
12	Av. João XXIII	Vila Formosa
13	Av. Líder	Itaquera
14	Av. Mercedes	Lapa
15	Av. Ministro Nelson Hungria	Vila Tramontano
16	Av. Nazaré	Ipiranga
17	Av. Nova Cantareira	Água Fria
18	R. Major Basílio	Água Rasa
19	R. Alberto Byington	Vila Maria Alta
20	R. Almirante Pereira Guimarães	Pacaembú
21	R. Aurélia	Vila Romana
22	R. Cardoso de Almeida	Sumaré
23	R. Cerro Corá	Alto da Lapa
24	R. do Paraíso	Paraíso
25	R. Dom Villares	Vila das Mercês
26	R. Dr. Eduardo Cotching	Anália Franco
27	R. Dr. Lino de Moraes	Vila California
28	R. José Ramon Urtiza	Vila Andrade
29	R. Major Basílio	Vila Bertoga
30	R. dos Marapé	Vila Campestre
31	R. Marcílio Franco	Vila Isolina Mazzei
32	R. Monte Magno	Vila Matias
33	R. Paraíso	Vila Maria
34	R. Regente Feijó	Vila Regente Feijó
35	Av. São Gualter	Alto de Pinheiros
36	Viaduto Cangaíba	Cangaíba

Mapa com a localização dos pontos de amostragem com o RSD

Anexo D – Padrões de emissão para veículos de passageiros na União Européia

EU emission standards for gasoline passenger cars (g/km)

Phase	Date	CO	HC	HC+NOx	NOx	PM
E0	< Jul 1992	NA	NA	NA	NA	NA
E1	Jul 1992 – Dez 1995	2.2	-	0.97	-	
E2	Jan 1996 – Dez 1999	2.3	0.2	0.50	-	
E3	Jan 2000 – Dez 2004	1.0	0.1	-	0.15	
E4	Jan 2005 – Ago 2009	1.0	0.1	-	0.08	
E5	Set 2009 – Ago 2014	1.0	0.1	-	0.06	0.005
E6	Set 2014 ahead	1.0	0.1	-	0.06	0.005

[http://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/STUD/2016/587331/IPOL_STU\(2016\)587331_EN.pdf](http://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/STUD/2016/587331/IPOL_STU(2016)587331_EN.pdf)

APÊNDICE A

Reprodução do artigo a ser submetido a revista especializada

Criteria for Otto cycle light-duty vehicles with high emissions of carbon monoxide, hydrocarbons or nitrogen monoxide based on remote sensing device measurements in the Brazilian fleet.

Antonio de Castro Bruni (bruni@alumni.usp.br)
CETESB – São Paulo State Environmental Agency
Av. Professor Frederico Hermann Jr. 345 – Alto de Pinheiros – São Paulo / SP –
Brazil - CEP 05489-900

João Vicente de Assunção
Public Health School – University of São Paulo.

ABSTRACT

To define criteria based on measurements with a remote sensing device (RSD) to identify Otto cycle LDV [light duty vehicles] with high emissions of carbon monoxide, hydrocarbons or nitrogen monoxide, we used data from 179,142 vehicles in metropolitan São Paulo, with complete measurements. We adjusted statistical models of *GAMLSS - Generalized Additive Models for Location, Scale and Shape* class to test the influence of fuel type, VSP [vehicle specific power] and Proconve [Brazilian vehicle emission control program] phases on measurements of CO, HC and NO emission indexes. The emissions were then conceptually subdivided into two groups: vehicles with *normal* and *abnormal* emission, this for the various pollutants in vehicles of L3, L4 and L5 phases. Latent variables were defined to indicate the distribution of vehicles in relation to those groups and phases. The algorithm *EM-Expectation - Maximization* was employed to identify all the parameters of the distributions. To determine the limits values for vehicles with high emissions of pollutants and Proconve phase, we use the 98% percentiles of the distributions set for vehicles of groups with normal emissions, therefore, the type I error was set at 2% and this percentage has been established considering the type II error of indicating the vehicle as normal emission when in fact it is a High emitter. Indicative values were determined with high emissions vehicles according to the pollutant and Proconve phase.

Key words: Vehicle emission, on-road measurement, vehicle specific power, remote sensing devices, I/M program, high emitters, carbon monoxide, hydrocarbons, nitrogen monoxide.

1. Introduction

One of the main problems that most affects the urban areas is air pollution, and this is not restricted to developing countries; it also affects developed countries. Population growth in urban areas, associated with the expansion of the fleet of motor vehicles in these areas, leads to serious air pollution problems with reflections on health in the exposed population, mostly children under 5 years of age and the elderly.

BALES (2015) cites in his work, several studies that associate air pollution to reduced lung function, asthma in children, changes in heart rate, low birth weight, diabetes and cancer. A review on the topic, specific to metropolitan São Paulo, can be found in (TOLEDO 2011).

In 2013, the WHO, through its regional office in Europe, published a report titled *Review of evidence on health aspects of air pollution – REVIHAAP Project* in which it presents a comprehensive review of the health effects associated with air pollution. The report provides answers to 24 questions relevant to policy development in European Union relating related to air quality management. They are issues related to health effects due to particulate matter, ozone and NO₂ near the traffic lanes (WHO, 2013).

The WHO pointed out in a recent publication that approximately 600,000 deaths of children under 5 years of age occur annually and furthermore that more than 50% of deaths from pneumonia are attributed to air pollution (WHO, 2017). Air pollution is additionally responsible for the increased risk of respiratory infections, asthma, neonatal adverse conditions and congenital anomalies.

Recent research indicates that air pollution is responsible for affecting the cognitive development of children and inducing the development of chronic diseases in adulthood. (WHO, 2016a; WHO, 2016b; SLY, 2016). Although domestic, commercial and industrial sources also contribute to urban air pollution, it is known that between 70% and 80% of air pollution in developing countries is due to vehicles, largely caused by older vehicles with deficient maintenance, road infrastructure and poor fuel quality (GULIA, 2015).

Recent studies published by *COMEAP-Committee on the Medical Effects of Air Pollutants*, to quantify the damages to health associated with air pollutants, HITCHCOCK et.al. (2014) present a summary of said pollutants. Figure 1 shows the evolution of the number of pneumonia hospitalizations by age group in São Paulo

City.

Figure 1 – Tax of hospitalizations due to pneumonia by age group – São Paulo city

Most of the air quality management strategies in Brazil are based on the Proconve or stem from the same. The CONAMA resolution 18/1986 sets out the objectives of the program in its first article. The reductions in emissions of pollutants were established by Proconve in phases. In Table 1 we present the phases and their limits for Otto cycle light duty vehicles.

Table 1 – Proconve Otto cycle Light Duty Vehicles Emissions Limits according to phases

Pollutant	Phase				
	Phase I	II	Phase III	Phase IV	Phase V
	1988	1992	1997	2007	2009
CO [g/km]	24.0	12.0	2.0	2.0	2.0
HC [g/km]	2.1	1.2	0.3	0.3	0.3
NMHC [g/km]	-	-	-	0.16	0.05
NO _x [g/km]	2.0	1.4	0.6	0.25	0.12
PM [g/km]	-	-	0.05	0.05	0.05
RCHO [g/km]	-	0.15	0.03	0.03	0.02
Evaporative [g/test]	6.0	6.0	6.0	2.0	2.0

The problem of air pollution in the São Paulo Metropolitan Region – SPMR – has as one of its main sources the light duty vehicles of the Otto cycle. They were responsible, in 2012, for 71% of the carbon monoxide emissions (94,000 tons/year) and 65.4% of the non-methane hydrocarbons (27,240 t/year), as reported by the São Paulo State Environmental Agency (CETESB, 2013).

One of the factors that aggravate the problem is the vehicle maintenance status, which is accentuated by the age of the fleet and by traffic jams that reduce the average speed. In 2013, the average age of cars in the São Paulo State was 9 years. In metropolitan São Paulo, in 2010, the average age of vehicles inspected was 6.8 years.

All the efforts for reducing vehicular emissions must then be increased because every reduction achieved will in turn decrease the number of hospitalizations and deaths, as shown by studies of the Medical School at USP – the São Paulo State University (CANÇADO et.al., 2006; BRAGA et.al., 2001; MARTINS et. al., 2002; BRAGA et.al., 1999).

The problem of pollution generated by vehicles is of great magnitude, showing the tendency to deteriorate: the fleet continues to grow, the average speed in big cities is reduced more and more due to traffic jams, generating more pollution (MEHEL, 2015) and increasing fuel consumption. In addition, Brazil still faces a serious economic crisis dating from 2014, a fact that relegates to second place the preventive maintenance of vehicles, especially in metropolitan São Paulo, now presently without the operation of the I/M Program, suspended in 2014.

The subway transportation is limited (only 77.5 Km) for a city with an estimated population of approximately 12 million people in 2016. All these facts point to the need for a holistic solution involving all agents.

Despite the Municipal Decree No. 53,989, Art. 8, dated 6/13/2013, having changed the frequency of inspections, the Otto-cycle vehicles:

- are exempt from inspection for the first 3 years;
- are inspected every two years from the 4th up to the 10th year, and;
- are inspected annually, from the 10th year of on, following the initial licensing.

A large portion of Otto vehicles will no longer be inspected by the I/M Program: they are exempt for the first 3 years after the initial licensing and the vehicles from the 4th to 8th years will be inspected every 2 years, but the percentages of disapproval/rejection of vehicles at these ages is not null, rather for the gasohol and

flex-fuel fleets it ranges from 15 to 20% for vehicles aged 6 to 8 years. The identification of these highly polluting vehicles and requirement, at any time, of their maintenance by the owner, would complement the efficiency of the I/M Program, that evaluates the vehicles periodically and dispenses from inspection the vehicles with up to 3 years of use.

It is in this context that remote sensing technology comes into the picture, tracking emissions during the use of the vehicles, and monitoring them in the periods when they are not required to perform inspections. It measures CO, HC and NO (and other pollutants) under the conditions of use (the vehicle is evaluated on-road) and provides indications of the need for maintenance/correction, constituting the so-called high-emitter vehicles. The establishment of cutoff values for these vehicles, employing the Remote Sensing Device, is the object of this study. In the Brazilian reality, the use of the RSD in the identification of high emitters will bring three benefits: identify malfunctioning vehicles and those in poor maintenance conditions (even though it has circumvented the I/M Program), evaluate the vehicles which have ceased undergoing the inspection (either due to release or avoidance), and may require the owner to carry out the inspection and identify the vehicle that has been "prepared" just to pass the inspection, returning in sequence to its real condition of high emitter. (Unfortunately, some mechanics rent the catalyst or the whole engine just for the vehicle to be approved.)

2. Material and Methods

Data were provided by Remote Sensing of Brazil Co., collected in the period between 1/22/2009 to and 2/25/2010 with a total of 875,415 measurements in São Paulo city. The equipment used in the data acquisition was the RSD4600 from Environmental System Products, Inc. – ESP – East Granby, Connecticut, USA.

Variables registered by RSD4600 were: date, time, location, slope, speed, acceleration, ER_{CO} , ER_{HC} , ER_{NO} , % CO_2 , relative humidity, ambient temperature and other variables related to data quality assurance (sensor validation status indicators). Photos were taken of the vehicles to identify the license plate numbers and other features of the vehicles.

The Pollutant Emission Rate - ER - is simply the number of pollutant molecules per CO_2 molecule in the exhaust plume. This is the fundamental quantity measured by the RSD4600. The use of CO_2 as a reference gas permits quantitative measurements

of exhaust species without knowledge of the exhaust plume location or extent of dilution. Since all gases in the exhaust plume are transported together by turbulent diffusion, the ratio of the measured column densities of a pollutant and CO₂ provides an emission index for that pollutant (JIMÉNEZ, 1999). We define the emission indexes as: $ER_{CO} = CO/CO_2$, $ER_{HC} = HC/CO_2$ and $ER_{NO} = NO/CO_2$.

For the identification of vehicles regarding their characteristics, we used the registration data of the company employed to perform the vehicular fleet inspections in São Paulo city. In the inspection procedure, the features of the vehicle are checked against the records of the São Paulo State Transit Department - DETRAN-SP, thus ensuring that the characteristics of the vehicles are current and correct.

The data we used are related to environmental vehicle inspection in the fiscal year 2009, when only light-duty vehicles manufactured from 2003 to 2008 (the 2009 vehicle year model were exempted from inspection) were inspected, totalling 1,185,869, and the fiscal year of 2010, when the whole fleet was inspected (except those made in 2010), a total of 2,514,111 light-duty vehicles.

The **Two-speed idle emission test** was the procedure adopted in the I/M program in São Paulo. Therefore, measurements were made with no load on the motor, evaluating the emissions of CO and HC at idle and at 2500 rpm. The I/M Program records were released solely to identify the characteristics of vehicles from their license plate numbers collected by the RSD.

The values adopted to filter velocity and acceleration were determined (BRUNI, 2018) as: $-2 \text{ (Km/h). s}^{-1} < \text{acceleration} < + 3.5 \text{ (Km/h). s}^{-1}$ and $15 \text{ km/h} < \text{speed} < 50 \text{ km/h}$. These values are very close to those adopted in the Denver University studies. Another parameter that interferes in the calculation of the VSP is the slope of the road. In our study the inclination has always been slightly positive, the average slope being 5.36° [3.30° ---- 7.20°]. The range of variation for the VSP was $[-9.83 \text{ ---- } +28.85] \text{ kW/t}$.

The equation employed for the VSP calculation is based on that found in FREY, 2003, as noted below:

$$VSP = (0.447 \times v)[1.1(0.447 \times a) + 9.81 \sin(R) + 0.132] + 0.000302 \times (0.447 \times v)^3$$

In the equation above: **a** is the acceleration (Miles/hour/s), **R** is the slope, in degrees, **v** is the speed in Miles/hour. The constant **0.447** transforms [miles/h] into [m/s]. For our purposes, it was necessary to consider only the measurements that have VSP values of ~~VSP~~ within a range which does not significantly affect the

emissions. According to JIMÉNEZ, 1999, the majority of the transient high emissions occur at very low or very high VSP values. In Figure 2, the histogram of observed VSP values for vehicles of the study is presented.

Figure 2 – VSP Histogram

We adjusted the distributions that the pollutants emissions indexes follow and, once identified, adjusted the models including the following factors: VSP range, fuel and Proconve phases.

We set *Generalized Additive Models for Location, Scale and Shape* to assess the influence of the Proconve phases, fuel type and VSP ranges on measures of El_{CO} , El_{HC} and El_{NO} , which offered support for the definition of the criteria to be taken into consideration in identifying the *High emitters* vehicles.

EM - Expectation-Maximization – This interactive method was applied to identify the two distributions that are mixed, one associated with the normal vehicle emissions and the other with the high emitter emission vehicles to estimate their parameters and determine the distribution of the latent variable indicative of which fleet distribution the vehicle belongs to.

As the distributions of pollutants emission index of Normal vehicles mingles with that of high emission, the 98% percentile - p98% - in the distribution of Normal emission vehicles was adopted as the cutoff value indicating the highly polluting vehicles [high emitters]. This was performed for the rates of CO, HC and NO, according to the factors significance obtained from the GAMLSS results.

Statistical analysis and graphics were made using the software **R** (R Core Team, 2017).

3. Results

The total number of vehicles measured by the RSD that formed the basis for the following results was 179,142 Otto cycle light-duty vehicles. The largest portion of the fleet (59.59%) is comprised by Flex-fuel vehicles, the gasohol fleet represented 34.82%, the ethanol vehicles, only 1.12%, and the vehicles converted to gas, 4.47%.

The distribution according to the Proconve phases showed that most vehicles measured belonged to the Phase IV (58.66%), phase III, 34.42% and phase V, 4.26%. In vehicles prior to the implementation of the Proconve, Phases I and II represented just 2.65% of the sampled fleet.

The majority of the measurements (87%) were made in the range of 0 to 10 kW/t, only 4 vehicles presented a VSP above 25kW/t. Figure 2 presents the histogram with all the VSP values for the sampled fleet. This distribution profile shows the quality of the field work, either by track slope or vehicles speeds and accelerations of passing vehicles, measured by the sensors.

Figure 3 presents the emissions behavior in the Proconve phases, making clear the impact of the program on the pollutants emitted by Otto cycle light-duty vehicles. A small reduction was obtained in phase II for CO, but the impact was acute from the phase III onwards. Only in phase III and onwards was a significant impact in reducing HC emissions observed. The emissions did not show impact due to the Proconve phases. A small increase was observed in phases IV and V, which was not expected. A small reduction was obtained in phase II for CO, but the impact was pronounced from the phase III onwards. Significant impact in reducing HC emissions was only observed from phase III onwards.

The NO emissions did not show a reduction due to the Proconve phases. On the contrary, a small increase was observed in phases IV and V, which was not expected.

Figure 3 – Impacts of Proconve phases on pollutant emissions indexes

In Figure 4, the behavior of pollutants emitted according to the vehicle specific power – VSP – is presented.

Figure 4 – Pollutant Emission Indexes according vehicle specific power – VSP

We found that the NO emission behavior in the Proconve phases was not affected by the VSP. The four vehicles with VSP over 25 kW/t were removed from the models adjustment that tested the influence of the factors on emissions. The VSP did not impact the CO and HC emissions, (Figure 4) which were almost constant in all tracks up to the 25 kW/t.

The CO and HC emissions were impacted by the Proconve phases. For the gasohol-powered vehicles, a significant increase in NO emissions are observed from vehicles in Phases IV and V. The emission behavior of flex-fuel vehicles was quite close in phases III, IV and V, showing no significant impact on the NO emission for that portion of the fleet.

To evaluate which factors should be controlled in the criteria for identification of LDV-Otto cycle high emitters, the GAMLSS models (RIGBY, 2005) were adjusted. The controlled fixed factors were: VSP, Proconve phases and fuel type. The dependent variables were the rates of emission of the pollutants CO, HC and NO. Table 2 presents the results of the $\ln(\text{CO}/\text{CO}_2)$ model adjustment.

Table 2 – $\ln(\text{CO}/\text{CO}_2)$ model adjustment results

CO/CO₂ model	Estimate	Std.Error	t-value	Pr(> t)
(Intercept)	-3.1210	0.0972	-32.1200	<2e-16
VSP[-5 - 0)	0.0587	0.0772	0.7610	0.4469
VSP[0 - 5)	0.0504	0.0752	0.6690	0.5034
VSP[5 - 10)	0.0399	0.0758	0.5260	0.5987
VSP[10 - 15)	0.0425	0.0864	0.4920	0.6230
VSP[15 - 20)	0.0121	0.6992	0.0170	0.9862
GASOHOL	0.1169	0.1729	0.6760	0.4989
GASOHOL/LNG	0.0614	0.0596	1.0310	0.3029
ETHANOL/LNG	0.0024	0.0793	0.0300	0.9758
ETHANOL/NG	-0.0264	0.0409	-0.6450	0.5189
GASOHOL/NG	0.0171	0.0207	0.8280	0.4079
FLEX	-0.0708	0.1643	-0.4310	0.6665
Phase I	0.0233	0.0696	0.3350	0.7379
Phase II	-0.0697	0.0602	-1.1580	0.2471
Phase III	-0.0994	0.0582	-1.7060	0.0882
Phase IV	-0.1048	0.0613	-1.7110	0.0873
Phase V	-0.1341	0.0704	-1.9040	0.0570

As can be observed, the impact of VSP on CO emissions was not significant. Fuel type also did not influence the CO emissions. For the Proconve phases, a

differentiated behavior was observed in the vehicle emissions in phases III, IV and V; they were significantly smaller than those observed prior to the Proconve implementation and its phases I and II. It has been established that, for identification of vehicles with high emissions, the phases III, IV or V should be taken into consideration, establishing separate limits for each one of them.

The model results for $\ln(\text{HC}/\text{CO}_2)$ showed that only vehicles in phase V presented different behavior. The observed reductions in phases III and IV had a lesser magnitude, their control not being required in the establishment of criteria for identification of High-emitter vehicles.

The results of the adjustment to the model for the $\ln(\text{NO}/\text{CO}_2)$ showed that only vehicles converted to operate with gas exhibited significant impact on emissions. The VSP and Proconve phases did not show significant effects on emissions.

As the converted fleet of vehicles is small (4.2%), and has been decreasing in São Paulo city, there is no reason to have high-emitter vehicle criteria for this type of vehicle. All vehicles converted to operate on natural gas (NG) were removed from the analysis, so the distributions found theoretically reflect only the condition of the vehicle emission with the original emission characteristics.

In conclusion, the emission characteristics of carbon monoxide, which reflected the impact of the technological change triggered by Proconve, pointed to the need for establishing the indicative values of highly-polluting vehicles for Proconve phases III, IV and V and also highlights the need to establish new boundaries for future Proconve phases.

The statistical models showed that the emissions of those three pollutants from Flex vehicles and those powered solely by gasohol are relatively close, which does not justify establishing limit values separately. Therefore, the limits established for Proconve phases III, IV and V and are valid for both types of vehicles. It should be noted that the flex-fuel vehicles were launched in 2003 in phase IV and must meet the same limits for CO and HC established for gasohol-powered vehicles in the I/M Program idling test.

Once identified that only Proconve phases interfered significantly in emissions, it became necessary to distinguish, for each pollutant, the two distributions that mingle with the fleets of vehicles with normal emissions from those with high emissions.

The interactive method for approximation of the likelihood function was employed and the Expectation-Maximization - EM, for identification of those distributions, enabling

the estimation of its parameters. The software package from R that was employed was the **mixtools**. (BENAGLIA, 2009). This algorithm is widely used in unsupervised learning techniques [unsupervised learning] in Artificial Intelligence.

In Figure 5, mixtures of distributions identified by the technique for the pollutant NO are presented. The other figures for CO and HC can be obtained at BRUNI, 2018.

Figure 5 – Distributions mixture identified for NO emission index by phases

The parameters associated with those distributions are shown in Table 3. The lambda values are relative to the distribution of the latent variable associated with the vehicle conditions.

Table 3 – Parameters from adjusted distributions for pollutant emission levels - transformed data (ln)

Pollutant	Phase	Lambda		Averages		Sigma	
		Normal %	HE %	Normal	HE	Normal	HE
CO	III	62.25%	37.75%	-3.019733	-2.346986	0.1785325	0.6144841
	IV	70.55%	29.45%	-3.097640	-2.586898	0.1232572	0.5132330
	V	80.55%	19.45%	-3.118599	-2.691142	0.1258257	0.4813513
HC	III	50.30%	49.70%	3.526026	4.316673	0.2294173	0.5996441
	IV	62.27%	37.73%	3.416052	3.898543	0.1761595	0.4869285
	V	82.41%	17.59%	3.464561	3.808146	0.1608930	0.4144450
NO	III	59.01%	40.99%	3.026056	4.037919	0.3452406	0.5597630
	IV	53.13%	46.87%	3.063428	4.125857	0.3465660	0.6406402
	V	53.19%	46.81%	3.179835	4.362698	0.3691238	0.5470041

HE: High Emitter

As can be observed, the proportion of the fleet with high CO and HC emissions decreases with the Proconve phases to which they belong. For NO, this does not occur and the proportion remains at a fairly high level. In Table 4, the limit values for the vehicle condition of high emissions and the respective probabilities of detection of this condition with one measured by the RSD.

Table 4 – Limit Values for pollutant emission rate identification of the High-Emitter vehicles

Pollutant rate	Proconve Phase	High Emitter cutoff	Detection Probability
CO/CO ₂	III	0.0305	69.02%
	IV	0.0182	69.16%
	V	0.0173	63.67%
HC/CO ₂	III	29.5232	70.21%
	IV	18.7697	59.70%
	V	19.5228	51.17%
NO/CO ₂	III	41.9825	70.44%
	IV	43.7003	69.86%
	V	51.4328	70.52%

The values pointed to in Table 4 are the pollutants emission rates by Proconve phases. The probability of detection, with one measurement by the RSD, is relative to the condition of the vehicle with a high emission of that pollutant and the Proconve phase.

4. Discussion

The impact of Proconve on emissions of CO, HC and NO detected by the RSD, in the condition of use

Based on measurements made using the RSD, the impact on CO emissions in Proconve phase II and accelerated reduction in Phases III, IV and V are notable. As for HC emissions, reduction has been detected only in phase III and accelerated reduction in phases IV and V. The NO emission reduction was not observed as per the Proconve phases, the average emission remained at the same level and there was little increase which was not expected. Furthermore, reduction in later phases would be expected.

The percentages of high-emitters according to fuel type and model.

As can be observed in Figure 6, the percentage of High-emitters of NO showed a tendency to decrease in vehicles with year models from 2005 and earlier. As for the percentages of High-emitters of CO and HC, their percentages decreased with the vehicle model year (MY). In 2009, the vehicle inspection tested cars manufactured from 2003 onwards, which certainly led to the reduction of the high percentage of vehicles with high emissions.

Figure 6 – Percentage of High-Emitters by MY and pollutant-2009/2010

In figures 7, 8 and 9 the proportions of High-emitter vehicles for each pollutant studied, depending on the model year and fuel, are presented.

Figure 7 - Percentage of Vehicles with high emission of CO by MY and fuel - 2009/2010

As can be observed, from 2006 onwards the proportion of vehicles with a high emission of CO decreases, the decline being more accentuated in gasohol-powered vehicles.

Figure 8 – Percentage of Vehicles with high emission of HC by MY and fuel- 2009/2010

For the proportion of vehicles with high emissions of HC, the behavior was very similar to that of gasohol-powered vehicles and Flex-fuel vehicles. The percentages were very close in MY 2007 to 2010.

Figure 9 – percentage of Vehicles with high emission of NO by MY and fuel - 2009/2010

For NO emissions, gasohol-powered vehicles showed significantly higher percentages than the same MY (2006 to 2010) of flex-fuel vehicles. The decrease that had been observed in the models from 1999 to 2005, was reversed by gasohol, which increased the percentage of high emitters to over 70%.

Percentage of ethanol in Gasohol

The evolution of the percentage of ethanol in gasoline is presented in Table 5. The percentage rose from 20% to 23% on 11/10/2006 and again on 6/27/2007 to 25%, remaining at this percentage until 02/01/2010, meaning that when the measurements using the RSD were made, the percentage of ethanol in gasoline was 25%.

Table 5 - Chronogram of automotive fuel mixture in Brazil

Applicable legislation		% Ethanol	Validate date
Number	Date		
Regulatory Ordinance MAPA No.51	02/22/2006	20%	03/01/2006
Regulatory Ordinance MAPA No.278	11/10/2006	23%	11/20/2006
Regulatory Ordinance MAPA No.143	06/27/2007	25%	07/01/2007
Regulatory Ordinance MAPA No.7	01/11/2010	20%	02/01/2010
		25%	05/02/2010
Regulatory Ordinance MAPA No.678	08/31/2011	20%	10/01/2011
Regulatory Ordinance MAPA No.105	02/01/2013	25%	05/01/2013
Federal Law No. 13033	09/25/2014	18 to 27.5%	02/16/2015
Regulatory Ordinance MAPA No.75	03/05/2015	27%	03/16/2015

Source: (CETESB, 2016)

A significant impact was observed in 2007 on increasing concentrations of NO_x in the air evaluated at the air quality station located in Ibirapuera Park, despite the long-term trend of a $-0.84 \mu\text{g}/\text{m}^3$ decrease per year, with a confidence interval $[-1.01-----0.69]$ (BRUNI, 2018).

Considering that the percentage of ethanol in gasoline rose from 20% to 25% in 2007, this percentage remaining until the end of the survey, this may be the possible cause of the increase in NO_x emissions from gasoline-powered vehicles. Additional studies are needed to verify this hypothesis.

5. Conclusions

Controlling the field characteristics, so that the VSP does not affect the emissions, only the Proconve phases will define different limits for the high-emitter identification in the Brazilian fleet. The acceleration should vary between $-2 (\text{Km}/\text{h})/\text{s}^{-1} < \mathbf{a} < +3.5 (\text{Km}/\text{h})/\text{s}^{-1}$ and speed should vary between $15 \text{ km}/\text{h} < \mathbf{v} < 50 \text{ km}/\text{h}$. The slope should be positive, greater than 3° and less than 8° .

Flex-fuel and gasohol vehicles presented the same behavior for CO and HC emissions, decreasing with the Proconve phases, whereas a significant difference was observed for NO. One hypothesis is that the increment of ethanol in the fuel blend affected the emissions of imported gasoline vehicles.

The use of the pollutant emission index is mandatory because when a flex-fuel vehicle is sampled the blend it has in its tank is unknown, and there is no significant difference between fuel-flex and gasohol-powered vehicle emissions.

The EM method successfully identified the two distributions, by phase and pollutant, which represent normal vehicle emissions and high-emitters. The 98% Percentile of normal vehicle emission was successfully used to identify high-emitter vehicles. This method may also be used to identify low-emitter vehicles, and for this, it is necessary to make more than one measurement with the RSD.

Considering the new procedure of the I/M Program, the identification of high-emitters will produce a significant reduction in pollutant emissions and may point to the need for a change in the inspection frequency, without subjectivity.

Acknowledgments

Our thanks to BR Inspeções Ltda., which kindly provided the remote sensing data, the SVMA – Metropolitan Sao Paulo Green and Environment Secretariat - which kindly furnished the vehicle inspection data between 2009 and 2010, CETESB, which supported the project and Leo Stephen Mahar for English review.

Disclaimer

The authors declare that there was no financial or personal relationship with other people or organizations that could inappropriately influence (bias) their work. Conflicts of interest: none.

Bibliography

- BALES MP (2015) **Proposta metodológica para o desenvolvimento de índice que reflita o impacto das emissões de poluentes de veículos do ciclo Otto na qualidade do ar da Região Metropolitana de São Paulo**. Dissertação de Mestrado. Faculdade de
- Saúde Pública – USP. São Paulo. 80p.
- BENAGLIA T et. al. (2009). mixtools: An R Package for Analyzing Finite Mixture Models. *Journal of Statistical Software*, **32**(6), 1-29. URL <http://www.jstatsoft.org/v32/i06/>.
- BRAGA ALF et al. (2001) Health effects of air pollution exposure on children and adolescents in Sao Paulo, Brazil. *Pediatr Pulmonol*. **31**(2):106-13.
- BRAGA ALF et.al. (1999) Air Pollution and Pediatric Respiratory Hospital Admissions in São Paulo, Brazil, in *J. Environ. Med.* 1, pp. 95-102.
- BRUNI AC (2018) **Critérios para identificação de veículos leves do ciclo Otto com elevadas emissões, utilizando dispositivo de sensoriamento remoto**. Tese de Doutorado. Faculdade de Saúde Pública – USP. São Paulo. 153p. (in press)
- CANÇADO JED et.al.(2006); Repercussões Clinicas da exposição à poluição atmosférica, *J. bras. pneumol*. **32** (2), São Paulo, May 2006.
- CETESB (São Paulo) **Emissões veiculares no estado de São Paulo 2012** [recurso eletrônico] /CETESB ; coordenação técnica Marcelo Pereira Bales; elaboração Antônio de Castro Bruni [et al.]. São Paulo: CETESB, 2013. 108 p.: il. color. (Série Relatórios / CETESB, ISSN 0103-4103)

- CETESB (São Paulo) **Emissões veiculares no estado de São Paulo 2015** [recurso eletrônico] /CETESB ; coordenação técnica Marcelo Pereira Bales; elaboração Antônio de Castro Bruni [et al.]. São Paulo: CETESB, 2016. 219 p. : il. color. (Série Relatórios / CETESB, ISSN 0103-4103)
- FREY HC et.al.(2003) "Modeling Mobile Source Emissions Based Upon In-Use and Second-by-Second Data: Development of Conceptual Approaches for EPA's New MOVES Model," *Proceedings, Annual Meeting of the Air & Waste Management Association*, Pittsburgh, PA, June 2003.
- GULIA S et.al.(2015) Urban air management – A review. *Atmospheric Pollution Research* (6) 286-304.
- HITCHCOCK G et.al. (2014) **Air quality and Road transport – Impacts and solutions**, London, UK, 139p.
- JIMÉNEZ-PALACIOS JL, **Understanding and quantifying motor vehicle emissions with vehicle specific power and TILDAS remote sensing**, 1999, 360p. MIT PhD Thesis.
- MARTINS LC et.al.(2002) Air pollution and emergency room visits due to chronic lower respiratory diseases in the elderly: an ecological time-series study in Sao Paulo, Brazil. *J Occup Environ Med.* **44**(7):622-7.
- MEHEL A, MURZYN F (2015) Effect of air velocity on nanoparticles dispersion in the wake of a vehicle model: wind tunnel experiments. *Atmospheric Pollution Research* (6): 612-617.
- R Core Team (2016). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <https://www.R-project.org/>.
- RIGBY RA and STASINOPOULOS DM (2005). Generalized additive models for location, scale and shape,(with discussion), *Appl. Statist.*, **54**, part 3, pp 507-554.
- SLY PD et al. (2016) Health Consequences of Environmental Exposures: Causal Thinking in Global Environmental Epidemiology. *Annals of Global Health.* **82**(1):3-9.
- TOLEDO GIFM, NARDOCCI AC (2011) Traffic related air pollution and population health: A review about São Paulo (SP), Brazil. *Revista Brasileira de Epidemiologia* **14**(3):445-454.

- WHO (2017) Don't pollute my future! The impact of the environment on children's health. Geneva, Switzerland, 36p. (+<http://www.who.int/phe/en/> accessed in 03/18/2017).
- WHO (2016a). Global Health Observatory (GHO) data: Causes of child mortality [website]. Geneva: World Health Organization; 2016 (http://www.who.int/gho/child_health/mortality/causes/en/, accessed in 03/17/2017).
- WHO (2016b). Ambient air pollution: A global assessment of exposure and burden of disease. Geneva: World Health Organization.
- WHO (2013) Review of evidence on health aspects of air pollution – REVIHAAP Project. European Centre for Environment and Health, Bonn. 302p.

APÊNDICE B

Avaliação dos ajustes e modelos finais por poluente

Relação dos modelos ajustados para o Monóxido de Carbono - CO

Modelo CO	Variáveis			Parâmetros				gl	AIC
	VSP	Combustível	Fase do Proconve	μ	σ	υ	τ		
m1f	-	-	√	√	√	√	√	24	2987,70
m1e	-	-	√	√	√	√	-	19	3034,39
m1d	-	-	√	√	√	-	-	14	3049,99
m1	√	√	√	-	-	-	-	20	3141,28
m1a	√	-	√	-	-	-	-	14	3146,86
m1b	-	-	√	-	-	-	-	9	3148,00
m1c	-	-	√	√	-	-	-	9	3148,00

Relação dos modelos ajustados para os Hidrocarbonetos - HC

Modelo HC	Variáveis			Parâmetros				gl	AIC
	VSP	Combustível	Fase do Proconve	μ	σ	υ	τ		
m2d	-	-	√	√	√	-	-	14	3887,71
m2e	-	-	√	-	√	√	-	19	3900,93
m2f	-	-	√	√	√	√	-	19	3900,93
m2	√	√	√	-	-	-	-	20	4008,95
m2a	√	-	√	-	-	-	-	14	4019,08
m2b	-	-	√	-	-	-	-	9	4029,89
m2c	-	-	√	√	-	-	-	9	4029,89

Relação dos modelos ajustados para o óxido de nítrico - NO

Modelo NO	Variáveis			Parâmetros				gl	AIC
	VSP	Combustível	Fase do Proconve	μ	σ	υ	τ		
m3	√	√	√	-	-	-	-	20	3441,37
m3e	-	-	√	-	√	√	√	24	3447,93
m3f	-	-	√	√	√	√	√	24	3447,93
m3d	-	-	√	√	√	-	-	14	3470,98
m3a	√	-	√	-	-	-	-	14	3479,00
m3b	-	-	√	-	-	-	-	9	3501,91
m3c	-	-	√	√	-	-	-	9	3501,91

Comportamento dos resíduos dos modelos – à direta o modelo Final

Resultados dos modelos finais ajustados

CO/CO₂	Estimativa	Std. Error	T-Student	Pr(> t)
(Intercepto)	-3.057970	0.053330	-57.345	<2e-16
Fase L1	0.030390	0.075910	0.400	0.689000
Fase L2	-0.067370	0.057600	-1.170	0.242200
Fase L3	-0.103860	0.053390	-1.945	0.051900
Fase L4	-0.120240	0.053220	-2.259	0.024000
Fase L5	-0.149760	0.058590	-2.556	0.010700

HC/CO₂	Estimativa	Std. Error	T-Student	Pr(> t)
(Intercepto)	4.715580	0.159610	29.545	<0.001
Fase L1	0.030240	0.272750	0.111	0.911726
Fase L2	-0.004640	0.171140	-0.027	0.978372
Fase L3	-0.182610	0.161810	-1.129	0.259211
Fase L4	-0.216980	0.160590	-1.351	0.176805
Fase L5	-0.781890	0.233330	-3.351	0.000821

NO/CO₂	Estimativa	Std. Error	T-Student	Pr(> t)
(Intercepto)	3.763460	0.045280	83.111	<0.001
GASOOL	0.233450	0.239520	0.975	0.329900
GASOOL/GNV	-0.591630	0.124280	-4.760	0.000002
ETANOL/GNV	-0.439740	0.188300	-2.335	0.019600
ETANOL/GN	-0.315880	0.077700	-4.065	0.000050
GASOOL/GN	-0.184160	0.025630	-7.185	<0.001
FLEX	0.079050	0.126790	0.623	0.533100