



X - 693 – MONITORAMENTO EM TEMPO REAL DAS EMISSÕES DE POLUENTES EM VEÍCULOS LEVES NO RIO DE JANEIRO UTILIZANDO EQUIPAMENTOS DE BAIXO CUSTO

Josie Batista Bastos Carvalho⁽¹⁾

Licenciada em Química pela Universidade do Grande Rio. Mestre em Engenharia Ambiental pela Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ). Doutoranda em Engenharia Ambiental - DEAMB/UERJ.

Eduardo Monteiro Martins⁽²⁾

Químico pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ). Mestre e Doutor em Físico-Química pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ). Professor Associado da UERJ - Campus Resende.

Sérgio Machado Corrêa⁽³⁾

Licenciado em Química pela Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ). Mestre e Doutor em Físico-Química pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ). Professor Titular da UERJ - Campus Resende.

Endereço⁽¹⁾: Rua São Francisco Xavier, 524 – Maracanã – Rio de Janeiro - RJ - CEP: 20.550-900 - Brasil - Tel: (21) 2334-0512 - e-mail: josiecarvalho@eng.uerj.br

RESUMO

Os veículos automotores são caracterizados como as maiores fontes de emissão de poluentes em regiões altamente urbanizadas. Mesmo com as inovações tecnológicas de motores e combustíveis, o crescimento da frota veicular e as características geográficas do Rio de Janeiro contribuem para deterioração da qualidade do ar. Este trabalho teve o objetivo de avaliar as emissões veiculares através do uso da medição a bordo em veículos leves utilizando equipamentos de baixo custo. Foram medidos, em tempo real, os poluentes atmosféricos CO, NO_x e HC em dois veículos *flex fuel* da fase Proconve - L6, abastecidos com gasolina C. Os fatores de emissão médios do veículo 1 para os poluentes CO (553,15 mg km⁻¹) e HC (381,04 mg km⁻¹) foram superiores em 52 e 16 vezes quando comparados ao veículo 2. A partir da metodologia robusta e de baixo custo utilizada neste trabalho, espera-se contribuir cientificamente na avaliação da qualidade do ar, além de corroborar com dados reais na elaboração de inventários de fontes móveis e na elaboração de políticas públicas.

PALAVRAS-CHAVE: emissões veiculares, poluentes atmosféricos, medição a bordo, fator de emissão, Proconve.

INTRODUÇÃO

As emissões veiculares têm contribuído significativamente para a degradação da qualidade do ar, especialmente nos grandes centros urbanos e são influenciadas por diversos parâmetros, como as características do veículo, comportamento do condutor, condições da via, volume de tráfego, velocidade, aceleração e condições climáticas (AGARWAL; MUSTAFI, 2021; AZEVEDO, 2019; BERTONCINI et al., 2021; KUPPILI et al., 2021).

O Brasil ocupa a 9ª posição na fabricação de veículos no mundo (FRUTUOSO et al., 2023). Em 2020, foram licenciados 1,9 milhões de veículos leves novos no Brasil, dos quais 85,2% do total era da categoria *flex fuel*, com projeção de crescimento para 89% até 2031 (EPE, 2021). Essa categoria opera com E27 (gasolina com 27% de etanol), E100 (etanol 100% hidratado) ou qualquer mistura entre os dois. Considerando os veículos do ciclo Otto e diesel, os principais poluentes emitidos são o monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO₂), óxidos de nitrogênio (NO_x), dióxido de enxofre (SO₂), hidrocarbonetos (HC) e material particulado (MP) (CASSIANO et al., 2016; FRUTUOSO et al., 2023).



Em condições reais, as emissões veiculares podem variar expressivamente dos ensaios de homologação de veículos novos realizados em laboratório. Portanto, as metodologias de monitoramento em uso real são essenciais para avaliar essas emissões. A medição a bordo, amplamente utilizada no mundo, é capaz de monitorar poluentes em tempo real através de equipamentos analíticos conhecidos como sistemas portáteis de monitoramento de emissões (PEMS), durante qualquer percurso e com diversos tipos de veículos e combustíveis (AGARWAL; MUSTAFI, 2021; CAO et al., 2020; D'ANGELO; GONZÁLEZ; TIZZE, 2018; DHITAL et al., 2019; KUPPILI et al., 2021; WANG et al., 2020). O PEMS oferece uma alternativa acessível e prática aos métodos tradicionais de medição em laboratório, permitindo a coleta de dados em tempo real e refletindo de forma mais precisa o impacto das variáveis operacionais (JAIKUMAR; NAGENDRA; SIVANANDAN, 2017).

No Brasil, os fatores de emissão para fins de homologação de veículos novos são obtidos a partir de ensaios em dinamômetro de chassi, sob condições controladas, de acordo com a norma ABNT NBR 6601 (ABNT, 2021). Esses resultados devem atender ao Programa de Controle de Poluição do Ar por Veículos Automotores (PROCONVE), que estabelece limites máximos de emissão para veículos leves e pesados no Brasil (BRASIL, 2018).

O Estado do Rio de Janeiro possui a 5ª maior frota veicular brasileira, com mais de 7,7 milhões de veículos, sendo 4,9 milhões de veículos leves (SENATRAN, 2024). As características geográficas do Estado, associadas à alta radiação solar, favorecem as reações químicas e fotoquímicas entre os poluentes atmosféricos (CARVALHO et al., 2020). Além disso, há uma escassez de dados no Brasil acerca dos fatores de emissão de veículos em uso real, o que torna este estudo especialmente relevante. Assim, o presente trabalho teve como objetivo avaliar as emissões de veículos leves em uso real, utilizando medição a bordo com um sistema portátil de monitoramento de baixo custo.

MATERIAIS E MÉTODOS

AMOSTRAGEM

Para a realização dos ensaios, foram selecionados dois veículos da categoria *flex fuel*, com características distintas, conforme apresentado na Tabela 1.

Tabela 1: Especificação dos veículos utilizados nos ensaios.

Caracterização	Veículo 1	Veículo 2
Modelo	Peugeot 2008 – 1.6	Ford Fiesta – 1.0
Ano de fabricação	2018	2014
Válvulas	16	8
Categoria	SUV	Compacto
Transmissão	6 marchas câmbio automático	5 marchas câmbio manual
Potência (cv)	115	107
Consumo – gasolina ^(a) (km/L)	10,7	12,0
Consumo – álcool ^(a) (km/L)	7,5	8,0
Quilometragem total (km)	72.000	40.000
Certificado de homologação	Proconve – L6	Proconve – L6

(a) Trajeto urbano.

As amostragens ocorreram durante os períodos da manhã e tarde, entre 10 e 17 horas, visando cobrir o intervalo de menor tráfego veicular. Os ensaios foram conduzidos em dias úteis, nos meses de outono, inverno

e primavera, especificamente em junho, julho e outubro de 2023, com temperatura ambiente média de 25°C, em uma via de 8,2 km localizada na cidade de Resende, Rio de Janeiro. Foram realizados 15 ensaios com cada veículo, pelo mesmo circuito e com os mesmos condutores, com duração variando entre 11 e 12 minutos cada. O combustível empregado foi a gasolina C, composta por 27% de etanol anidro $\pm 1\%$ de água.

MEDIÇÃO A BORDO

Os compostos CO, HC e NO_x (NO e NO₂) foram medidos durante todo o percurso através de um analisador de gases portátil certificado, com precisão de $\pm 5\%$, e o fluxo dos gases de escapamento foi determinado por um manômetro digital de pressão diferencial com tubo Pitot, conforme apresentado na Figura 1. Os poluentes medidos são legislados pelo Proconve (BRASIL, 2009). Em conjunto, um dispositivo OBDII (do inglês *On Board Diagnostics*) foi utilizado para coletar dados do sistema de posicionamento global do veículo (sigla em inglês – *GPS*), além de dados dinâmicos do veículo, como velocidade (km/h), rotação do motor (rpm), aceleração ($m\ s^{-2}$), entre outros.



Figura 1: Equipamentos embarcados: analisador de gases portátil (a) e medidor de fluxo de gases de escapamento (b).

O sistema experimental foi adaptado de Cassiano et al. (2016) e montado na parte traseira de cada veículo, conforme ilustrado na Figura 2. Um tubo prolongador de alumínio com formato circular, medindo 0,6 mm de diâmetro por 0,6 m de comprimento, foi acoplado ao cano de escapamento do veículo para diluir os gases de exaustão e acomodar a sonda do analisador de gases e demais sensores. Todos os equipamentos foram calibrados e embarcados no porta-malas dos veículos, sendo acionados somente antes da partida do motor.



Figura 2: Veículos 1 (a) e 2 (b) com o tubo prolongador e sensores acoplado ao sistema de escapamento.



Os fatores de emissão baseados na distância foram calculados a partir das taxas de emissão instantâneas dos poluentes, da distância e do tempo total percorrido, conforme apresentado na Equação 1, segundo Zhang et al. (2019). Os resultados foram multiplicados por 10^3 para serem expressos em mg km^{-1} . Foi utilizado o programa Excel para a análise estatística descritiva dos dados.

$$EF_i = \frac{\sum_{t=1}^T ER_{i,t}}{L}$$

Onde EF_i = é o fator de emissão do poluente i (em g/km);

$ER_{i,t}$ = é a taxa de emissão instantânea do poluente i no tempo t (em g/s);

T = tempo total percorrido (em s);

L = distância total percorrida (em km).

RESULTADOS

Os valores de média, mínimo, máximo e desvio padrão dos fatores de emissão calculados para cada poluente foram tratados através de análise estatística descritiva, com intervalo de 95% de confiança, apresentada na Tabela 2.

Tabela 2 – Média, desvio padrão, mínimo e máximo dos fatores de emissão para os veículos 1 e 2.

	Veículo 1			Veículo 2		
	CO (mg km^{-1})	NOx (mg km^{-1})	HC (mg km^{-1})	CO (mg km^{-1})	NOx (mg km^{-1})	HC (mg km^{-1})
Média	553,15	4,61	381,04	10,75	4,90	23,94
Desvio padrão	999,68	6,35	312,77	13,99	3,80	55,53
Mínimo	1,30	0,30	0,00	0,00	0,50	0,00
Máximo	3998,80	22,00	1165,40	54,50	11,80	214,60

Fonte: Própria autora (2024).

A Figura 3 apresenta os fatores de emissão de CO, NOx e HC determinados em cada ensaio para os dois veículos e os respectivos limites de emissão para cada poluente estabelecidos pelo Proconve L6.

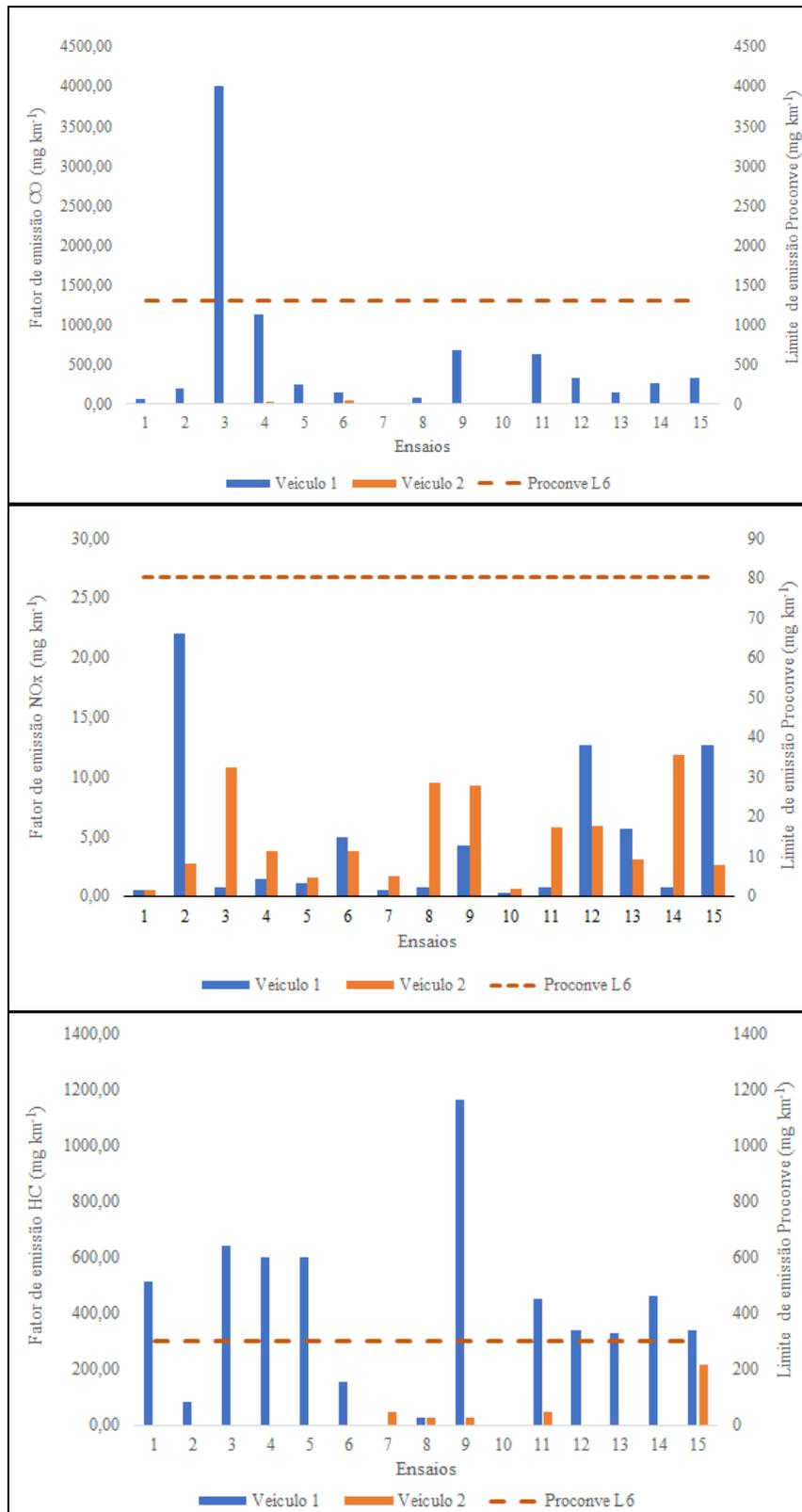


Figura 3: Comparação entre os fatores de emissão, em mg km⁻¹, de CO, NOx e HC, respectivamente, com os limites de emissão do Proconve L6.



O veículo 1 apresentou uma ultrapassagem na emissão de CO ao limite estabelecido pelo Proconve L6, porém o valor médio ($553,15 \text{ mg km}^{-1}$) se manteve abaixo do limite de emissão de 1.300 mg km^{-1} . O veículo 2 não apresentou ultrapassagem para este poluente. Assim, a média dos fatores de emissão do veículo 1 foi superior ao veículo 2 em 52 vezes.

Os fatores de emissão médios de NOx dos veículos 1 e 2 foram, $4,61 \text{ mg km}^{-1}$ e $4,90 \text{ mg km}^{-1}$, respectivamente, representando valores inferiores ao limite estabelecido pelo Proconve L6 (80 mg km^{-1}). Já para HC, os resultados apontaram que, o fator de emissão médio do veículo 1 ($381,04 \text{ mg km}^{-1}$) ultrapassou o limite de emissão do Proconve (300 mg km^{-1}). O veículo 2 não apresentou ultrapassagem para este poluente. Logo, a média dos fatores de emissão do veículo 1 foi superior ao veículo 2 em 16 vezes.

ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

De acordo com Aguiar *et al.* (2015), os veículos do ciclo Otto normalmente operam próximos à relação estequiométrica ar/combustível, o que resulta em maiores emissões de CO em comparação a NOx, corroborando com os resultados obtidos nesse estudo. Jaikumar, Nagendra e Sivanandan (2017) complementam essa observação, destacando que veículos movidos à gasolina emitem concentrações mais elevadas de CO e HC em comparação aos veículos movidos à diesel, que tendem a emitir maiores concentrações de NOx e MP.

Um estudo realizado por Ma et al (2021) sugere que os fatores de emissão tendem a ser influenciados pela idade ou alta quilometragem dos veículos, pois os veículos mais antigos podem apresentar deterioração significativa no desempenho do motor, nas peças e na eficiência catalítica.

Estudos realizados no Uruguai por D'Angelo et al. (2018) e na Malásia por Sofwan e Latif (2021) analisaram as emissões de CO, CO₂ e NOx em 11 veículos leves por medição a bordo utilizando equipamentos de baixo custo. Em ambos os estudos, os autores chegaram à conclusão de que a idade do veículo eleva as emissões de CO. Ko et al. (2019) utilizaram um sistema simples e relativamente barato para avaliar as emissões de um veículo leve a diesel na Coreia do Sul. Este sistema, constituído por um sensor, mediu as emissões de NOx na estrada resultando em valores mais elevados em todos os casos analisados. Os autores concluíram que as condições reais de uso influenciavam significativamente as emissões.

Apesar dos avanços tecnológicos em motores e combustíveis, e da diferença de idade entre os veículos analisados neste estudo, a quilometragem elevada do veículo 1 (72.000 km) em comparação ao veículo 2 (40.000 km) pode influenciar as emissões mais altas de CO e HC. Cassiano et al. (2016) indica que o elevado fator de emissão de HC sugere uma possível ineficiência do catalisador, uma vez que a presença desse poluente no escapamento resulta da combustão incompleta, geralmente causada pela falta de O₂ no motor ou durante as desacelerações do veículo.

Foram comparados os resultados deste estudo com outros realizados no Brasil e no mundo. Policarpo et al. (2018) analisaram um veículo *flex fuel* da fase Proconve L6 por medição a bordo na cidade de Fortaleza, Brasil. Os fatores de emissão encontrados foram 2,4 vezes superiores para CO e 24 vezes para NOx quando comparados a este trabalho. Cassiano et al. (2016), também na cidade de Fortaleza com um veículo da mesma fase, relataram fatores de emissão de $6,70 \text{ mg km}^{-1}$ para CO, $0,40 \text{ mg km}^{-1}$ para NOx e $1,10 \text{ mg km}^{-1}$ para HC, onde estes foram 82, 12 e 346 vezes inferiores, respectivamente, às médias calculadas neste estudo.

Kuppili et al. (2021) estimaram os fatores de emissão médios para 58 veículos leves movidos a diesel e a gasolina por medição a bordo em Delhi, Índia. Os valores de CO, HC e NO encontrados foram de 7.260, 170 e 620 mg km^{-1} , respectivamente, trazendo resultados 13 e 126 vezes maiores que as médias observadas neste estudo para CO e NOx. No entanto, para HC, a média foi 2,2 vezes inferior. Yang et al. (2020) avaliaram os mesmos poluentes um veículo leve a gasolina em diferentes rotas na cidade de Lyon, França. Os autores encontraram fatores de emissão 16 vezes maiores para NOx, mas 24 e 127 vezes menores para CO e HC, respectivamente, quando comparados às médias desse estudo.



CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Os fatores de emissão de CO, NO_x e HC foram determinados utilizando equipamentos de baixo custo em dois veículos *flex fuel* em condições reais, abastecidos com gasolina C. Os fatores de emissão de NO_x estavam abaixo do limite estabelecido pelo Proconve L6 para ambos os veículos. O veículo 1 apresentou resultados 52 e 16 vezes maiores para os poluentes CO e HC, respectivamente, quando comparados ao veículo 2. No entanto, apenas o fator de emissão médio de HC do veículo 1 (381,04 mg km⁻¹) excedeu o limite de emissão do Proconve L6, de 300 mg km⁻¹.

Os resultados deste estudo demonstram uma grande variabilidade nas emissões veiculares, influenciadas por fatores como as características de cada veículo, manutenção dos dispositivos de controle de emissão, o comportamento do condutor e demais fatores. O estudo sugere que a redução dos padrões de emissão somente não é suficiente para controlar as emissões, destacando a necessidade de programas de inspeção e manutenção de veículos. Contudo, faz-se necessário uma investigação mais detalhada, com uma amostragem mais representativa, para melhor compreensão dessa dinâmica.

A metodologia de medição a bordo, devido a sua eficácia e robustez, tornou-se um ensaio complementar ao de homologação de veículos novos no Brasil a partir das fases L7 e L8 do Proconve. É importante ressaltar que os ensaios de homologação realizados pelas montadoras ocorrem em ambiente controlado, que pode não refletir as condições reais de uso, reforçando a necessidade de adaptações nos ensaios para representas as condições de tráfego e dirigibilidade locais. Espera-se que mais estudos utilizando essa metodologia sejam conduzidos, contribuindo de forma efetiva para a avaliação da qualidade do ar, modelagem atmosférica e inventários de fontes móveis.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 6601. Veículos rodoviários automotores leves – determinação de hidrocarbonetos, monóxido de carbono, óxidos de nitrogênio e dióxido de carbono no gás de escapamento. 57 p. Rio de Janeiro, 2021.
2. AGARWAL, A. K.; MUSTAFI, N. N. Real-world automotive emissions: Monitoring methodologies, and control measures. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Elsevier Ltd, 1 mar. 2021.
3. AGUIAR, S. D. O. et al. Avaliação das emissões de escapamento veicular em condições específicas do motor: partida e marcha-lenta. *Transportes*, v. 23, n. 3, p. 35, 23 dez. 2015.
4. AZEVEDO, J. A. H. Proposta metodológica para elaboração de fatores de emissão de veículos de carga a partir de perfis de condução. *Tese de Doutorado* - Universidade Federal do Ceará, p. 161, 2019.
5. BERTONCINI, B. V. et al. Onboard analysis of vehicle emissions in urban ways with different functional classifications. *Urban Climate*, v. 39, 1 set. 2021.
6. BRASIL. Resolução CONAMA nº 415 de 24/09/2009. Dispõe sobre nova fase (PROCONVE L6) de exigências do Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores-PROCONVE para veículos automotores leves novos de uso rodoviário e dá outras providências. Brasília, 2009.
7. BRASIL. Resolução nº 492, de 20 de dezembro de 2018. Estabelece as Fases PROCONVE L7 e PROCONVE L8 de exigências do Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores - PROCONVE para veículos automotores leves novos de uso rodoviário, altera a Resolução CONAMA nº 15/1995 e dá outras providências. Brasília, 2018.
8. CAO, X. et al. The effects of biodiesel blends on real-world carbonyl emissions from diesel trucks. *Atmospheric Environment*, v. 238, 1 out. 2020.
9. CARVALHO, J. B. B. et al. Btex impacts in urban areas of the city of Rio de Janeiro. *Química Nova*, v. 43, n. 7, p. 870–877, 1 jul. 2020.
10. CASSIANO, D. R. et al. On-board Monitoring and Simulation of Flex Fuel Vehicles in Brazil. *Transportation Research Procedia*. Anais. Elsevier B.V., 2016.
11. D'ANGELO, M.; GONZÁLEZ, A. E; TIZZE, N. R. First approach to exhaust emissions characterization of light vehicles in Montevideo, Uruguay. *Science of the Total Environment*. v. 618, p. 1071-1078, 2018.
12. DHITAL, N. B. et al. VOCs emission characteristics in motorcycle exhaust with different emission control devices. *Atmospheric Pollution Research*, v. 10, n. 5, p. 1498–1506, 2019.



SIMPÓSIO LUSO-BRASILEIRO
DE ENGENHARIA SANITÁRIA
E AMBIENTAL



13. EPE. Demanda de Energia dos Veículos Leves do Ciclo Otto: 2022 – 2031 – Número 4. Rio de Janeiro, dezembro de 2022.
14. FRUTUOSO et al. Assessing light flex-fuel vehicle emissions with ethanol / gasoline blends along an urban corridor: A case of Fortaleza/Brazil. *International Journal of Transportation Science and Technology* v. 12, p. 447–459, 2023.
15. JAIKUMAR, R.; SHIVA NAGENDRA, S. M.; SIVANANDAN, R. Modal analysis of real-time, real world vehicular exhaust emissions under heterogeneous traffic conditions. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, v. 54, p. 397–409, 2017.
16. KO, J.; MYUNG, C. L.; PARK, S. Impacts of ambient temperature, DPF regeneration, and traffic congestion on NOx emissions from a Euro 6-compliant diesel vehicle equipped with an LNT under real-world driving conditions. *Atmospheric Environment*, v. 200, p. 1–14, 2019.
17. KUPPILI, S. K. et al. Characteristics of real-world gaseous exhaust emissions from cars in heterogeneous traffic conditions. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, v. 95, 2021.
18. MA et al. Transient Characterization of Automotive Exhaust Emission from Different Vehicle Types Based on On-Road Measurements. *Atmosphere*, v. 11, p. 64, 2020.
19. POLICARPO, N. A. et al. Emission estimates for an on-road *flex-fuel* vehicles operated by ethanol-gasoline blends in an urban region, Brazil. *Urban Climate*, v. 24, p. 111–120, 2018.
20. SENATRAN. Estatísticas - frota de veículos. Disponível em: <<https://www.gov.br/transportes/pt-br/assuntos/transito/conteudo-Senatran/frota-de-veiculos-2024>>. Acesso em junho de 2024.
21. SOFWAN, N. M.; LATIF, M. T. Characteristics of the real-driving emissions from gasoline passenger vehicles in the Kuala Lumpur urban environment. *Atmospheric Pollution Research*, v. 12, n. 1, p. 306–315, 2021.
22. YANG, Z. et al. Real-world gaseous emission characteristics of Euro 6b light-duty gasoline- and diesel-fueled vehicles. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, v. 78, 2020.
23. WANG, H. et al. Evaluating mobile monitoring of on-road emission factors by comparing concurrent PEMS measurements. *Science of the Total Environment*, v. 736, 2020.
24. ZHANG, L. et al. Comparison of real-world emissions of LDGVs of different vehicle emission standards on both mountainous and level roads in China. *Transportation Research Part D*, v. 69, p. 24–39, 2019.