

Veículos elétricos e seus impactos na poluição atmosférica da Região Metropolitana de São Paulo

1. Introdução

A poluição atmosférica e suas causas têm sido temas prioritários em diversas discussões acerca da sustentabilidade e preservação do meio ambiente mundial, sobretudo considerando o século atual. Dos diversos componentes que poluem o ar e alteram sua qualidade, como dióxido de enxofre (SO₂), dióxido de nitrogênio (NO₂), monóxido de carbono (CO) e gás carbônico (CO₂), destaca-se o último pelo fato de estar diretamente relacionado à queima de combustíveis fósseis e, portanto, à frota mundial de veículos movidos a gasolina ou óleo diesel. Em outras palavras, alterações no número absoluto de tais veículos nas vias urbanas indicariam forte influência nos níveis de emissão de gás carbônico nos centros urbanos e, conseqüentemente, na qualidade do ar dos mesmos. China e Estados Unidos são os principais emissores de gás carbônico; tal dado está possivelmente atrelado ao fato de que tais países apresentam, atualmente, as maiores frotas de veículos no mundo (Boden et al., 2017). Na Região Metropolitana de São Paulo (RMSP), considerando uma janela temporal de 2006 a 2017 é possível observar uma certa estabilidade nas emissões de gases poluentes. No entanto, o Estado de São Paulo, ocupou a quarta posição dentre os estados mais poluentes do país em 2018. Restringindo o universo à cidade de São Paulo, a Secretaria de Infraestrutura e do Meio Ambiente do Estado lista o município como um dos piores em qualidade do ar em 2019, ocupando a 164ª posição.

Dado o crescimento expressivo da poluição atmosférica, surge uma discussão relevante a respeito das possíveis causas para aumentos tão intensos em uma curta janela temporal. Sem dúvida, um dos pontos mais abordados neste âmbito diz respeito aos gases emitidos por veículos movidos a gasolina ou óleo diesel e à expansão constante de sua frota ao longo das últimas décadas. No período de 2009 a 2017, a frota de veículos no Brasil saltou de 29,9 para 43,3 milhões de unidades. Em outras palavras, houve no país um aumento de aproximadamente 45% em apenas nove anos (Banco de Informações de Transportes, 2018). Na Região Metropolitana de São Paulo que é o foco deste estudo, de 2010 a 2017, houve um aumento de aproximadamente 19% na frota.

Diante de um contexto no qual a poluição e suas implicações são protagonistas nas pautas atuais, somado ao constante desenvolvimento de novas tecnologias, o mercado automotivo vislumbrou uma oportunidade a ser explorada; diversas montadoras do segmento passaram a produzir e comercializar de forma mais escalar, sobretudo na última década, veículos elétricos, movidos a bateria. Trata-se de uma discussão ampla e complexa, no entanto, diversos países, principalmente aqueles considerados desenvolvidos, pretendem gerar maior penetração de veículos elétricos no mercado automotivo o quanto antes, indicando uma possível revolução deste segmento no curto ou médio prazo.

O Brasil não possui uma frota significativa de carros movidos a bateria em suas vias, uma vez que a produção doméstica de tais bem é nula e sua penetração de mercado ainda pouco expressiva, sequer representando 1% do setor no país (Auto veículos, 2018). Ademais, é válido complementar que os veículos elétricos possuem pouca representatividade devido aos altos preços pelos quais são comercializados, o que acaba excluindo a grande maioria da parcela de consumidores de carros no país. Dessa forma, altos preços somados a diversas questões socioeconômicas fazem com que o mercado brasileiro de veículos elétricos ainda se mostre em fase embrionária.

No entanto, ainda que se encontre numa situação inicial de desenvolvimento, as perspectivas de médio prazo são otimistas, indicando um crescimento considerável na próxima década no número de licenciamentos de tais veículos no país. Exemplo disto é que no período

de janeiro a outubro de 2019, o número de veículos elétricos licenciados saltou de 370 unidades para 1989 unidades, isto é, avançou mais de 400% em um curto espaço temporal (Auto veículos, 2018).

Com base neste contexto, o presente estudo buscar elaborar 3 cenários e simular o impacto da frota de veículos elétricos na poluição atmosférica da Região Metropolitana de São Paulo. Pretende também identificar a existência de potenciais efeitos socioeconômicos como, PIB, atividade industrial e população nos níveis de poluição, bem como os efeitos das greves no transporte público, das condições meteorológicas e condições de saneamento. A motivação para estudar a Região Metropolitana de São Paulo é justificada, por um lado pelo fato de que, em termos de nível de poluição atmosférica e qualidade do ar, não demonstra estar em uma situação adequada e, por outro lado, se trata de um grande polo econômico-financeiro do país, no qual a introdução ou expansão da frota de veículos elétricos em suas vias urbanas impactariam de forma positiva na redução de poluentes.

Este artigo está estruturado em cinco seções, de modo que a seção seguinte analisa os acadêmicos que suportam o desenvolvimento do presente estudo. A seção 3 se refere à Metodologia utilizada, explicitando as bases de dados coletadas, as variáveis escolhidas e o modelo econométrico. A quarta seção diz respeito aos Resultados atingidos a partir do modelo testado, embasando o estudo empírico. Por fim, a seção 5 apresenta as Conclusões a serem feitas a partir dos resultados observados.

2. Fundamentação Teórica

2.1. Emissão de CO₂: causas e impactos

A emissão global de gás carbônico, principal poluente do ar, tem apresentado forte crescimento desde o século XIX, fato que está associado ao aumento da frota mundial de automóveis na mesma época. Dessa maneira, estabelece-se uma relação entre poluição atmosférica e veículos movidos a gasolina ou óleo diesel.

Rivers, Saberian e Schaufele (2017) buscam identificar justamente a relação explicitada acima, isto é, investigar os efeitos do transporte público na poluição urbana, considerando as dezoito principais cidades do Canadá. Os autores utilizam o modelo econométrico de dados em painel, considerando distintas janelas temporais para analisar o efeito observado em cada poluente atmosférico. A variável resposta é composta por uma média diária de concentração de alguns poluentes do ar (monóxido de carbono, dióxido de nitrogênio e materiais particulados) em uma determinada cidade num ano, mês e dia específicos. A variável de interesse do estudo é uma *dummy* que mede o impacto na poluição de greves no transporte público de uma determinada, assumindo valor um em dias de greve e zero caso contrário. As principais evidências encontradas indicam que uma hipotética remoção de veículos públicos em tais cidades reduziria, no curto prazo, significativamente a concentração de dióxido de nitrogênio no ar. Além disso, os resultados apresentam indícios de que greves no transporte público podem ser benéficas para a qualidade do ar via o que os autores nomearam de *swap* na poluição.

Em linha com o estudo mencionado de Rivers, Saberian e Schaufele (2017), Bauernschuster, Hener e Rainer (2017) propõem analisar os impactos de greves no transporte público na poluição atmosférica. No entanto, não se limitam a investigar somente tal efeito, direcionando a obra também a impactos das greves em acidentes de trânsito, no congestionamento e na saúde dos habitantes, considerando as áreas urbanas da Alemanha. Através de séries temporais e *cross-sectional variations*, os autores elaboram distintas regressões com distintas variáveis resposta e explicativas, mas atribuindo uma variável *dummy* de interesse em comum para todas, a qual assume valor um em dias de greve no transporte público alemão e zero caso contrário. Dentre as evidências apresentadas, destacam-se os

impactos observados no: (i) número de admissões relacionadas a questões respiratórias de crianças nos hospitais, cujo valor excedeu 10% em dias de greve, (ii) número de acidentes de trânsito, representando um aumento de 14% em dias de greve, visto que o trânsito de carros aumenta e (iii) poluição atmosférica, a qual, assim como o item (ii), indicou um aumento de 14% em dias de paralisação do transporte público na Alemanha.

Um terceiro estudo de Andrade, Kumar, Freitas, Ynoue, Martins, Martins, Nogueira, Martinez, Miranda, Albuquerque, Gonçalves e Zhang (2017) explicita a evolução da qualidade do ar da cidade de São Paulo nos últimos trinta anos, além de propor perspectivas futuras acerca do tema. Os autores apresentam detalhadamente as características dos poluentes do ar que foram analisados e os impactos observados a partir de regulações, intervenções e políticas públicas nos mesmos. As principais conclusões obtidas apontam uma redução da maioria dos poluentes, como dióxido de enxofre, materiais particulados, dióxido de nitrogênio e monóxido de carbono nas últimas décadas, indicando que medidas e incentivos governamentais foram positivos para a melhora da qualidade do ar da cidade. Finalmente, os autores propõem algumas medidas para que a qualidade do ar da Região Metropolitana de São Paulo siga progredindo nos próximos anos. Alguns exemplos válidos se voltam à expansão da malha do transporte público urbano, o qual impactaria diretamente a parcela mais vulnerável da população da cidade, localizada em suas periferias, além do desenvolvimento de novas tecnologias que seriam capazes de reduzir o barulho dos veículos e tempo de viagem dos motoristas, culminando em melhor qualidade de vida da população.

O estudo de Stucchi (2018) analisa impactos de greves no transporte público na poluição atmosférica da Região Metropolitana de São Paulo e no número de admissões relacionadas a problemas circulatórios e respiratórios nos hospitais, a partir da utilização do modelo econométrico de diferenças em diferenças. No caso, o evento exógeno para a elaboração do modelo é justamente a presença de greves no transporte público. A variável resposta da regressão proposta mede os níveis de concentração dos poluentes do ar dentro de um intervalo de uma hora; a variável de interesse segue o mesmo princípio dos estudos mencionados anteriormente, isto é, trata-se de uma *dummy* que assume valor igual a um em dias que houveram greves de trânsito e zero caso contrário. Destaca-se que as evidências encontradas no trabalho mostram um efeito positivo considerável nas admissões de crianças de até cinco anos nos hospitais da cidade com as complicações citadas acima.

2.2. Mercado de Veículos Elétricos e impactos

O setor global de veículos elétricos vem apresentando importante crescimento em sua produção e comercialização e conseqüente maior penetração no mercado, sobretudo na última década, indicando que tal ascensão se tornará ainda mais expressiva nas décadas seguintes. Restringindo a análise ao mercado brasileiro, a produção e comercialização destes veículos apresenta relevância quase nula, devido a diversas questões socioeconômicas e dos altos preços pelos quais são comercializados. No entanto, também acompanha a tendência global, visto que as projeções de vendas e penetração de mercado no curto prazo são otimistas.

Um estudo de Baran e Legey (2011) apresenta uma breve história a respeito dos veículos elétricos nos Estados Unidos, detalhando seus principais acontecimentos e ciclos. Na seção do estudo em questão, os autores discutem um momento, no início do século XIX, de ascensão momentânea seguida de forte queda deste mercado, mencionando as devidas razões que culminaram para tal. Em seguida, um novo ciclo de reabilitação do setor é analisado, o qual se iniciou na década de 1960; a partir da década seguinte, a preocupação com questões ambientais e o conceito de desenvolvimento sustentável ganham força nos Estados Unidos, proporcionando uma nova oportunidade para o mercado de veículos elétricos. Os autores destacam que até o final do século XIX, o mercado passou por diversas adaptações e desafios

para que finalmente, no século XX, com o desenvolvimento de novas tecnologias, conquistasse maior expressividade. Por fim, abre-se uma discussão a respeito de países emergentes e a opção de inserção neste setor, na qual destaca-se a alta correlação positiva entre desenvolvimento econômico e frota de automóveis de um determinado país. Os autores buscam elucidar que, dada tal relação, países emergentes como o Brasil poderiam seguir o percurso de países desenvolvidos, como Estados Unidos e Alemanha.

Um outro trabalho, elaborado por Calef e Robert (2007) discute as medidas tomadas por representantes da França e do estado da Califórnia para promover veículos elétricos e híbridos e, conseqüentemente, reduzir a poluição atmosférica urbana de tais centros. As principais evidências encontradas indicam que França e Califórnia propuseram políticas públicas e incentivos relacionados à tecnologia distintos para a promoção de veículos híbridos e elétricos e conseqüente redução da poluição atmosférica urbana. Todavia, os resultados encontrados mostram que, direta e indiretamente, os impactos foram positivos para ambos os centros urbanos, indicando que estes representaram parcela significativa no mercado global de veículos elétricos e híbridos.

O estudo de Ferrero, Alessandrini e Balanzino (2015), com o título de *“Impact of electric vehicles on the air pollution from a highway”*, o qual, a partir de um modelo de dispersão numérica buscou quantificar o impacto da introdução de carros elétricos na frota de veículos na qualidade do ar da cidade de Milão, Itália. Aqui vale ressaltar que o estudo destes autores analisa o impacto na qualidade do ar propondo cenários da troca de veículos movidos a gasolina ou óleo diesel por aqueles movidos a bateria. Outros estudos seguem a mesma linha de argumentação mas focam as análises em outros contextos tais como Taiwan, em Dublin e em Barcelona e Madrid (Nan et al., 2016; O’Mahony e Brady, 2011; Soretet al., 2014).

Diante do exposto, lança-se mão da hipótese de pesquisa:

H1: O aumento na frota de veículos elétricos reduz o nível de poluição do município.

Para testar a hipótese acima, o modelo desenvolvido irá considerar alguns outros fatores que podem ter influência sob os níveis de poluição, tais como emissões de CO₂, PIB e atividade industrial dos municípios, população, existência de greves no transporte público, condições de saneamento, condições meteorológicas e arborização.

3. Metodologia

Este estudo é caracterizado como quantitativo e a análise empírica se dá a partir do método econométrico de *cross section*, considerando os 39 municípios da RMSP para o ano-base de 2017.

A lista dos municípios com suas respectivas sub-regiões é apresentada na Tabela 1.

Tabela 1 – Municípios e Sub-regiões – RMSP (2017).

| MUNICÍPIO | SUB-REGIÃO |
|---|------------|
| São Paulo | CAPITAL |
| Guarulhos Mogi das Cruzes Itaquaquecetuba Suzano Ferraz de Vasconcelos Poá Arujá Santa Isabel Biritba-Mirim Guararema Salesópolis | LESTE |
| Francisco Morato Franco da Rocha Caieiras Mairiporã Cajamar | NORTE |
| Osasco Carapicuíba Barueri Itapevi Santana de Parnaíba Jandira Pirapora do Bom Jesus | OESTE |
| São Bernardo do Campo Santo André Mauá Diadema São Caetano do Sul Ribeirão Pires Rio Grande da Serra | SUDESTE |
| Taboão da Serra Embu das Artes Cotia Itapeccerica da Serra Embu-Guaçu Vargem Grande Paulista Juquitiba São Lourenço da Serra | SUDOESTE |

Fonte: Elaboração Própria a partir de dados do EMPLASA (2019).

Para proceder as análises 3 cenários foram criados. A proposição de tais cenários se deu pelo fato de que o mercado de veículos elétricos brasileiro ainda possui pouca representatividade no setor automotivo e, portanto, indicaria impactos pouco relevantes ou até mesmo nulos no nível de poluição de cada município.

Um primeiro cenário mais conservador assume uma troca de vinte e cinco por cento da frota de veículos dos municípios. Já o segundo, uma troca mais moderada, de metade da frota de veículos; um terceiro cenário mais otimista tem como premissa analisar o impacto de uma troca de setenta e cinco por cento da frota de veículos dos municípios analisados. Com isso, espera-se que o efeito das simulações implique numa diminuição de poluição. Ainda, entende-se que o efeito terá maior magnitude em cenários nos quais a troca de veículos movidos a gasolina ou *diesel* por veículos elétricos for maior.

3.1. Fontes dos Dados

Os dados que dizem respeito à poluição da Região Metropolitana de São Paulo, as informações necessárias foram extraídas da Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB) e do Anuário de Energéticos do Estado de São Paulo.

Os dados referentes aos veículos elétricos, tanto a nível nacional como considerando apenas a cidade de São Paulo, foram retirados da Associação Brasileira do Veículo Elétrico (ABVE), da Associação Nacional dos Fabricantes de Veículos Automotores (ANFAVEA), do Departamento Estadual de Trânsito de São Paulo (DETRAN-SP) e do Departamento Nacional de Trânsito (DENATRAN). Em relação aos dados que dizem respeito aos veículos movidos a gasolina ou óleo diesel, seus dados também foram extraídos a partir de estatísticas do Departamento Estadual de Trânsito de São Paulo (DETRAN-SP) e do Departamento Nacional de Trânsito (DENATRAN).

Já os dados referentes às greves no transporte público e aos veículos (públicos e privados) da região foram extraídos da Companhia de Engenharia de Tráfego (CET), bem como da Companhia Paulista de Trens Metropolitanos (CPTM), da São Paulo Transporte (SPTrans) e do Departamento Estadual de Trânsito de São Paulo (DETRAN-SP). A Tabela 2 abaixo representa uma breve análise descritiva referente às greves públicas por meio de transporte, considerando o ano de 2017. A partir da mesma, é possível observar uma predominância quase integral de greves no metrô e ônibus, os quais, combinados, representam praticamente 100% do total absoluto no período destacado.

Tabela 2 - Greves totais por meio de transporte – RMSP (2017).

| Meio de Transporte | Greves | Duração (dias) |
|--------------------|-----------|----------------|
| Metrô | 11 | 17 |
| Trem | 1 | 1 |
| Ônibus | 9 | 16 |
| Total | 21 | 34 |

Fonte: Elaboração Própria a partir de dados da CET, CPTM e SPTrans (2018).

Os dados referentes à componentes meteorológicas foram retirados a partir de estatísticas do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) e do Centro de Gerenciamento de Emergências Climáticas da Prefeitura de São Paulo (CGE). Dados referentes ao nível de gestão ambiental, como arborização e saneamento, foram extraídos do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE).

Por fim, dados referentes a aspectos demográficos e populacionais dos municípios da RMSP também são advindos do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE).

3.2. Variáveis

3.2.1. Variável Resposta

A variável de interesse do estudo é o nível de poluição do município i . Definiu-se que a *proxy* para poluição será a nota atribuída a cada município de acordo com o Programa Município Verde Azul (PMVA), uma medida do Governo de São Paulo que utiliza uma série de critérios de modo a calcular tais *scores*, como qualidade do ar, saneamento básico, sustentabilidade e educação ambiental.

A variável será representada, então, por $PMVA_{t,i}$.

Ressalta-se que o índice t indica o ano de 2017, utilizado no modelo de *cross section*, e o índice i indica o município da RMSP em questão.

3.2.2. Variáveis Explicativas

A fim de analisar os impactos já mencionados anteriormente, o modelo estatístico terá como variáveis explicativas: (1) o nível de emissão de gás carbônico dos municípios da RMSP (em 10^3t), (2) a população absoluta do município i , (3) o nível absoluto de veículos elétricos do município i – de acordo com os cenários propostos, (4) o PIB dos municípios em questão (em R\$) e (5) o Valor da Transformação Industrial do município i , sendo esta última uma *proxy* para o nível de atividade industrial dos municípios no Estado de São Paulo, isto é, suas respectivas participações na indústria da região⁶.

Salienta-se que as variáveis (6) $GREVE_{t,i}$ e (7) $ESG_{t,i}$ acima são variáveis *dummy*. A primeira assume valor zero caso no município i não tenha ocorrido greve no transporte público e valor 1, caso contrário. Já a segunda assume valor 1, caso no município i haja tratamento de esgoto e valor zero, caso contrário. Lembra-se que o período de análise para o modelo de *cross section* é o ano de 2017.

As variáveis, assim, serão representadas por:

$CO2_{t,i}$

$POP_{t,i}$

$VE_{t,i}$

$PIB_{t,i}$

$VTI_{t,i}$

$GREVE_{t,i}$

$ESG_{t,i}$

3.2.3. Variáveis de Controle

Em relação às variáveis de controle, introduzidas no modelo de modo a viabilizar a utilização do método econométrico em questão e o atingimento de resultados robustos e consistentes para o estudo, tem-se: (1) o nível acumulado de precipitação anual (em mm) do município i e (2) o número absoluto de árvores presentes do município i . As variáveis, assim, serão representadas por:

$$\frac{PRECIP_{t,i}}{ARB_{t,i}}$$

3.3. Modelo Econométrico

O modelo econométrico busca analisar os impactos dos veículos elétricos na poluição dentro de ano singular, considerando os outros fatores descritos anteriormente. Dessa forma, a partir do método de Mínimos Quadrados Ordinários (MQO), realizamos três regressões da seguinte forma:

$$(1)$$

$$PMVA_{t,i} = \beta_0 + \beta_1 VE25_{t,i} + \beta_2 CO2_{t,i} + \beta_3 GREVE_{t,i} + \beta_4 \log PIB_{t,i} + \beta_5 POP_{t,i} + \beta_6 ESG_{t,i} + \beta_7 PRECIP_{t,i} + \beta_8 \log ARB_{t,i} + \beta_9 VTI_{t,i} + \varepsilon_{t,i}$$

$$(2)$$

$$PMVA_{t,i} = \beta_0 + \beta_1 VE50_{t,i} + \beta_2 CO2_{t,i} + \beta_3 GREVE_{t,i} + \beta_4 \log PIB_{t,i} + \beta_5 POP_{t,i} + \beta_6 ESG_{t,i} + \beta_7 PRECIP_{t,i} + \beta_8 \log ARB_{t,i} + \beta_9 VTI_{t,i} + \varepsilon_{t,i}$$

$$(3)$$

$$PMVA_{t,i} = \beta_0 + \beta_1 VE75_{t,i} + \beta_2 CO2_{t,i} + \beta_3 GREVE_{t,i} + \beta_4 \log PIB_{t,i} + \beta_5 POP_{t,i} + \beta_6 ESG_{t,i} + \beta_7 PRECIP_{t,i} + \beta_8 \log ARB_{t,i} + \beta_9 VTI_{t,i} + \varepsilon_{t,i}$$

Detaca-se que $\varepsilon_{t,i}$ se refere ao termo de erro aleatório não observável e que algumas variáveis foram testadas de acordo com seu logaritmo natural, de modo a possivelmente reduzir o efeito do viés de cada uma.

4. Resultados

4.1. Amostra e Análise Descritiva

Antes da apresentação dos resultados das regressões, é essencial expor uma análise descritiva dos dados coletados, a qual visa sumariza-los e trazer análises acerca de seus comportamentos no período em questão. A amostra conta com dados referentes às frotas veiculares, demográficos, condições meteorológicas e índices voltados à gestão ambiental dos trinta e nove municípios que compõem a Região Metropolitana de São Paulo.

A Tabela 3 abaixo traz uma sequência de todas as variáveis incluídas no modelo econométrico - isto é, a variável resposta, as variáveis explicativas e as variáveis de controle – e suas respectivas medidas estatísticas (média, desvio padrão, mínimo e máximo) de acordo com a amostra coletada. Ressalta-se o fato de que as variáveis **GREVE** e **ESG** são *dummies* e, portanto, seus dados são meramente ilustrativos. Ademais, destacam-se os altos desvios padrões das variáveis **CO2**, **VE** e **POP**, muito por conta da alta discrepância demográfica e participação industrial dos municípios em questão.

Tabela 3 – Análise Descritiva das variáveis do modelo

| | MÉDIA | DESVIO PADRÃO | MÍNIMO | MÁXIMO |
|----------------------------|-------------|------------------|----------|------------|
| PMVA | 23,662 | 20,2603 | 4,860 | 82,050 |
| CO2 (em 10 ³ t) | 734,355 | 2330,173 | 6,530 | 13.102,390 |
| PIB (em R\$) | 2,92E+10 | 1,11E+10 | 2,01E+08 | 6,99E+11 |
| VE25 | 79.536,400 | 319.194,900 | 122,750 | 2.009.206 |
| VE50 | 159.072,800 | 638.389,700 | 245,500 | 4.018.412 |
| VE75 | 238.609,200 | 957.584,600 | 368,250 | 6.027.618 |
| POP | 548.503,200 | 1.918.584,000 | 15.645 | 1,21E+11 |
| ESG | 0,897 | 957.584,600 | 0 | 1 |
| GREVE | 0,385 | 0,307 | 0 | 1 |
| PRECIP (em mm) | 1.556,231 | 261,137 | 1336 | 2.451 |
| ARB | 2.156.053 | 6.002.935 | 150 | 2,66E+07 |
| VTI | 0,008 | 0,015 | 0,000 | 0,090 |

Fonte: Elaboração Própria com as fontes citadas na seção anterior

Com a finalidade de estabelecer as dependências entre as variáveis do modelo econométrico acima, a Tabela 4 aborda a Matriz de Correlação das mesmas, indicando se a correlação é fraca, moderada ou alta, mas não necessariamente se há relação de causalidade. Vale salientar que as variáveis relacionadas ao número absoluto de carros elétricos dos municípios possuem correlação positiva perfeita entre si, uma vez que foram construídas de forma proporcional e de acordo com as premissas de cada cenário. Como foram feitas três regressões distintas para analisar o efeito de *VE25*, *VE50* e *VE75* na variável resposta separadamente, não há presença de colinearidade perfeita. A matriz segue a seguir:

Tabela 4 – Matriz de Correlação das variáveis do modelo

| | PMVA | CO2 | PIB | VE25 | VE50 | VE75 | ESG | GREVE | PRECI P | ARB | VTI | POP |
|------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|------------|-------|-------|-------|
| PMVA | 1.000 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| CO2 | 0.096 | 1.000 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| PIB | 0.178 | 0.904 | 1.000 | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| VE25 | 0.162 | 0.906 | 0.996 | 1.000 | - | - | - | - | - | - | - | - |
| VE50 | 0.162 | 0.906 | 0.996 | 1.000 | 1.000 | - | - | - | - | - | - | - |
| VE75 | 0.162 | 0.906 | 0.996 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | - | - | - | - | - | - |
| ESG | 0.072 | 0.090 | 0.072 | 0.072 | 0.072 | 0.072 | 1.000 | - | - | - | - | - |
| GREVE | (0.007) | 0.325 | 0.289 | 0.260 | 0.260 | 0.260 | 0.267 | 1.000 | - | - | - | - |
| PRECI P | (0.237) | (0.191) | (0.172) | (0.158) | (0.158) | (0.158) | 0.253 | (0.156) | 1.000 | - | - | - |
| ARB | 0.005 | 0.324 | 0.379 | 0.388 | 0.388 | 0.388 | (0.266) | (0.129) | (0.092) | 1.000 | - | - |
| VTI | 0.108 | 0.936 | 0.917 | 0.917 | 0.917 | 0.917 | 0.113 | 0.462 | (0.216) | 0.295 | 1.000 | - |
| POP | 0.154 | 0.919 | 0.996 | 0.998 | 0.998 | 0.998 | 0.076 | 0.275 | (0.168) | 0.381 | 0.927 | 1.000 |

Fonte: Elaboração Própria com as fontes citadas na seção anterior

Nota:

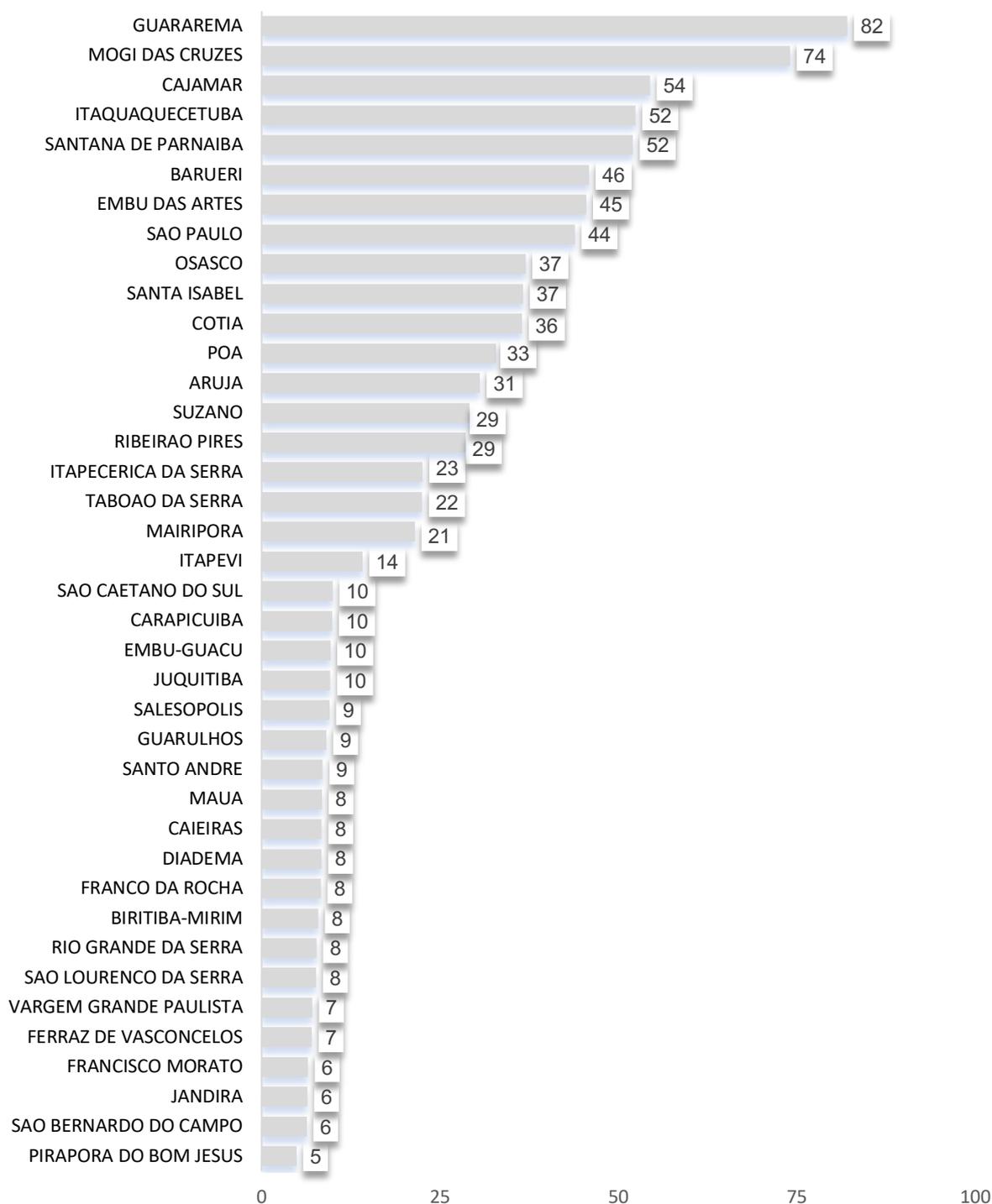
0 a 0.30: positivo ou negativo indica correlação fraca

0.30 a 0.70: positivo ou negativo indica correlação moderada

0.70 a 1.00: positivo ou negativo indica correlação forte

É de importância significativa descrever nesta subseção a variável resposta do modelo econométrico utilizado. A proxy deste estudo para indicar a poluição dos municípios analisados é dada pelo score atribuído a cada um de acordo com o PMVA. Sendo assim, a Figura 1 aborda justamente uma comparação de tais notas entre os indivíduos (municípios) da amostra, considerando o ano de 2017.

Figura 1 – Distribuição Municipal do *score* atribuído pelo PMVA (2017)

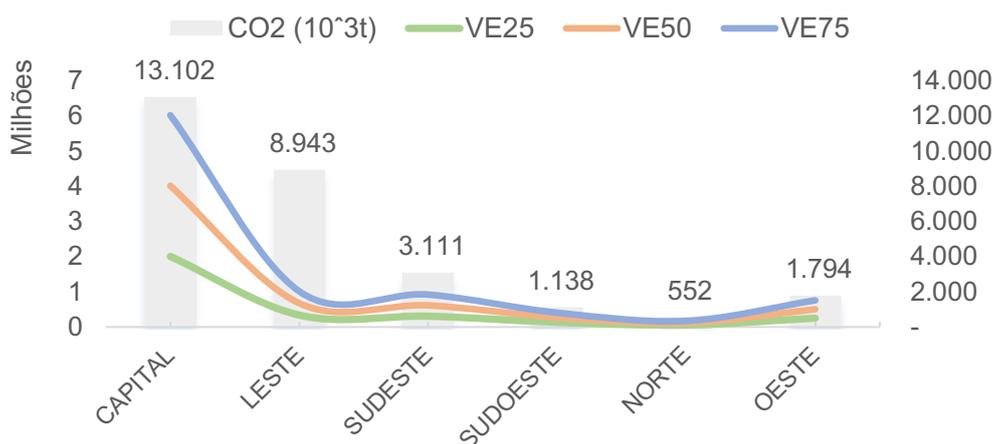


Fonte: Elaboração Própria a partir de dados da Secretaria de Infraestrutura e Meio Ambiente

Observando a Figura 1, a qual ordenou as notas atribuídas de forma decrescente, destacam-se algumas cidades, em termos de sua gestão ambiental. Guararema e Mogi das Cruzes apresentam scores substancialmente superiores à média dos dados coletados, de 23,66 – vide a Tabela 2 -, com os respectivos valores de 82,05 e 74,02. Ademais, sobressaem-se, de forma negativa, municípios com scores bem abaixo da média encontrada, como é o caso de Pirapora do Bom Jesus, São Bernardo do Campo, Jandira e Francisco Morato, por exemplo, cujas notas são, respectivamente, 4,86, 6,29, 6,40 e 6,49.

A Figura 2 apresenta comparação sub-regional entre os níveis de emissão de gás carbônico e a frota de veículos elétricos da RMSP, segundo as premissas deste estudo. Observa-se que, como esperado, as variáveis referentes aos veículos elétricos, em todos os cenários, seguem uma distribuição homogênea nas sub-regiões. Ademais, é interessante notar que as maiores concentrações de emissões de CO₂ acompanham as sub-regiões com maior frota de veículos, refletindo a forte correlação entre estas duas variáveis. É válido observar também que a Capital, composta somente pelo município de São Paulo, possui níveis de emissão de gás carbônico próximos à soma das emissões das demais sub-regiões, compostas por trinta e oito municípios, com o respectivo valor de 13.102.000t, ante o valor 15.537.000t dos mesmos.

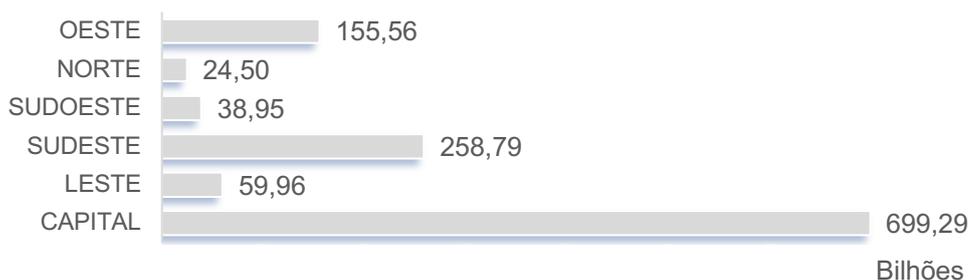
Figura 2 – Distribuição Sub-regional da RMSP do total de VEs e das emissões de CO₂ (2017)



Fonte: Elaboração Própria a partir de dados da CETESB e do DENATRAN (2017)

Por fim, a Figura 3 compara o nível de atividade econômica dos municípios nas sub-regiões da RMSP. Nela, é possível observar que o nível da Capital, composta por apenas um município, corresponde a, aproximadamente, cinquenta e seis por cento do Produto Interno Bruto da região se destacando por sua representatividade superior aos demais.

Figura 3 – Distribuição Sub-regional do Produto Interno Bruto (2017)



Fonte: Elaboração Própria a partir de dados do IBGE (2017).

4.1. Resultados das regressões nos cenários

Os resultados encontrados, indicando o valor do coeficiente de cada variável, bem como seus erros padrões e coeficientes de determinação (R^2) estão dispostos na Tabela 5.

Tabela 5 – Resultado das três regressões para a variável resposta *PMVA*

| VARIÁVEIS | CENÁRIO 1 | | CENÁRIO 2 | | CENÁRIO 3 | |
|----------------|-----------------|-------------|-----------------|-------------|-----------------|-------------|
| | Coeficiente | Erro Padrão | Coeficiente | Erro Padrão | Coeficiente | Erro Padrão |
| CO2 | -0,0051 | 0,0020 | -0,0051 | 0,0020 | -0,0051 | 0,0020 |
| VE25 | 0,0002** | 0,0001 | - | - | - | - |
| VE50 | - | - | 0,0001** | 0,0000 | - | - |
| VE75 | - | - | - | - | 0,0001** | 0,0000 |
| log PIB | 11,1035*** | 3,1911 | 11,1035*** | 3,1911 | 11,1035*** | 3,1911 |
| ESG | 12,2678 | 13,2772 | 12,2678 | 13,2772 | 12,2678 | 13,2772 |
| GREVE | -9,5482 | -1,1848 | -9,5482 | -1,1848 | -9,5482 | -1,1848 |
| PRECIP | -0,0039 | 0,0116 | -0,0039 | 0,0116 | -0,0039 | 0,0116 |
| log ARB | 1,6316 | 1,1848 | 1,6316 | 1,1848 | 1,6316 | 1,1848 |
| VTI | -1302,3440** | 620,7237 | -1302,3440** | 620,7237 | -1302,3440** | 620,7237 |
| POP | -0,0000 | 0,0000 | -0,0000 | 0,0000 | -0,0000 | 0,0000 |
| CONSTANTE | -232,3961*** | 79,0739 | -232,3961*** | 79,0739 | -232,3961*** | 79,0739 |
| R ² | 34,70% | | 34,70% | | 34,70% | |

Fonte: Elaboração Própria com as fontes citadas na seção anterior

Nota: A significância está indicada de acordo com: * $p < 0,1$, ** $p < 0,05$, *** $p < 0,01$

No primeiro cenário as variáveis **CO2**, **GREVE**, **PRECIP** e **POP** apresentaram coeficientes negativos, indicando uma possível redução nos *scores* dos municípios – sendo o coeficiente desta última, apesar de negativo, praticamente irrelevante. No entanto, os resultados para tais regressores não se mostraram estatisticamente significantes para um nível de significância de pelos menos noventa por cento, o que, portanto, inviabiliza a interpretação de seus coeficientes estimados. Já o coeficiente atrelado à variável **VTI** indicou efeito negativo e expressivo na variável dependente **PMVA**, com significância de noventa e cinco por cento. Ademais, ainda considerando o primeiro cenário, os coeficientes atrelados às variáveis **ESG** e **log ARB** se mostraram maiores do que zero, indicando um possível efeito positivo nas notas do **PMVA** e nas consequentes gestões ambientais dos municípios da amostra. Todavia, as variáveis não também não foram significantes para um nível de confiança de pelo menos noventa por cento. A variável correspondente ao Produto Interno Bruto, **log PIB**, obteve um coeficiente positivo e relevante para o modelo, além de significativo, considerando um nível de confiança de noventa e nove por cento. Por fim, a variável de interesse do modelo, cuja motivação e interesse foram mencionados ao longo do presente estudo, representada por **VE25**, apresentou um valor positivo de 0,0002 e significativo para um nível de confiança de noventa e cinco por cento. Tal resultado corrobora com a hipótese de que a introdução ou expansão da frota de veículos em um município deve levar a uma redução de sua poluição atmosférica e, conseqüentemente, a um *score* mais elevado de acordo com o **PMVA**.

Tendo em vista o segundo cenário proposto, os resultados dos coeficientes são idênticos para todas as variáveis, com exceção daquela que se refere aos veículos elétricos. Nesse caso, o coeficiente correspondente à variável *VE50* se mostrou estatisticamente significativo para um nível de confiança de noventa e cinco por cento e positivo, com valor de 0,0001, apesar de seu valor ter magnitude inferior ao valor encontrado no cenário anterior.

Considerando o terceiro cenário, os coeficientes das variáveis se mantiveram iguais aos encontrados no segundo cenário, inclusive aquele que se refere aos veículos movidos a bateria, *VE75*, com valor positivo e estatisticamente significativo para o mesmo nível de confiança anterior. Vale ressaltar que o efeito é marginalmente menor conforme há maior presença de veículos elétricos nas ruas dos municípios, o que se mostra em linha com a hipótese testada. Finalmente, os coeficientes de determinação (R^2) das três regressões apresentaram valor de 34,70%, o que indica que os regressores utilizados nas mesmas explicam 34,70% da variabilidade da variável dependente *PMVA*.

5. Conclusão

O presente estudo buscou observar o efeito que a presença de veículos elétricos nas ruas teria na poluição atmosférica de uma região a partir de três cenários distintos.

Os principais resultados atingidos indicaram um efeito positivo e estatisticamente significativo, com nível de confiança de noventa e cinco por cento, de *VE* na variável resposta dentro dos cenários elaborados, ou seja, um impacto que levaria os municípios a obterem notas maiores em relação às suas gestões ambientais; ressalta-se que a hipótese testada foi, portanto, confirmada.

Outras duas variáveis que se mostraram relevantes e significantes dizem respeito ao Produto Interno Bruto, em sua forma logarítmica, e ao Valor da Transformação Industrial da amostra, sendo que este primeiro apresentou coeficiente positivo e o segundo, um impacto negativo nas notas do PMVA.

As demais variáveis presentes indicaram efeitos de acordo com o esperado, porém, estatisticamente insignificantes, o que inviabilizou a interpretação das mesmas. Visto que os resultados acerca das variáveis de interesse se mostraram em linha com a hipótese destacada anteriormente, entende-se que o mercado de veículos elétricos pode ter impactos positivos na melhora dos índices de poluição das cidades.

Dessa forma, o presente estudo contribui para o debate sobre políticas públicas que incentivem a produção e comercialização de veículos elétricos, como por exemplo a isenção ou redução de impostos sob veículos. Sob a perspectiva do setor automotivo, vislumbra-se uma oportunidade de expansão do portfólio de produtos das grandes montadoras no futuro.

Este estudo possui, impreterivelmente, algumas limitações. Primeiramente, sugere-se para estudos futuros que mais variáveis explicativas sejam adicionadas às regressões, de forma a diminuir a probabilidade de omissão de algum fator que venha a ser relevante para o modelo. Ademais, uma vez que o mercado de veículos elétricos ainda não se mostra robusto no país, foram propostos cenários de análise, nos quais seus dados foram construídos a partir de premissas, isto é, não são dados diretamente observáveis; assim, seria interessante analisar futuramente o efeito *de facto* dos carros elétricos na poluição, isto é, com embasamento em dados observados – assumindo, obviamente, o estabelecimento e consolidação do setor no Brasil. Por fim, sugere-se para estudos futuros que se apropriem de uma janela temporal de análise mais extensa e, conseqüentemente, de uma amostra maior de observações, com o objetivo de captar os efeitos em destaque ao longo do tempo de maneira consistente.

REFERÊNCIAS

ANDRADE, M. DE F. et al. Air quality in the megacity of São Paulo: Evolution over the last 30 years and future perspectives. **Atmospheric Environment**, v. 159, p. 66–82. 2017.

Anuário de Energéticos do Estado de São Paulo. **Secretaria de Infraestrutura e Meio Ambiente**. 2018.

Auto veículos – Produção, licenciamento, exportações em unidades de montados e CKD (desmontados), exportações em valor e emprego. **Associação Nacional dos Fabricantes de Veículos Automotores**. 2018.

Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa. **Instituto Nacional de Meteorologia**. 2018.

Banco de Informações de Transportes. **Departamento Nacional de Trânsito**. 2018.

BARAN, R.; LEGEY, L. F. L. Veículos elétricos: história e perspectivas no Brasil. **Banco Nacional do Desenvolvimento Econômico e Social**. 2011.

BAUERNSCHUSTER, S.; HENER, T.; RAINER, H. When Labor Disputes Bring Cities to a Standstill: The Impact of Public Transit Strikes on Traffic, Accidents, Air Pollution, and Health. **American Economic Journal: Economic Policy**, v. 9, n. 1, p. 1–37. 2017.

BRADY, J.; O’MAHONY, M. Travel to work in Dublin: the potential impacts of electric vehicles on climate change and urban air quality. **Transportation Research Part D: Transport and Environment**. 2011.

CALEF, D.; ROBERT, G. The allure of technology: How France and California promoted electric and hybrid vehicles to reduce urban air pollution. **Policy Sciences**. 2007.

Companhia de Engenharia de Tráfego. **Secretaria Municipal de Mobilidade e Transportes**. 2018.

Emissões Veiculares no Estado de São Paulo. **Companhia Ambiental do Estado de São Paulo**. 2018.

FERRERO, E.; ALESSANDRINI, S.; BALANZINO, A. Impact of electric vehicles on the air pollution from a highway. **Applied Energy**. 2015.

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. 2017.

Mapa da Indústria Paulista. **Fundação Sistema Estadual de Análise de Dados**. 2019.

NAN, L.; CHEN, J. P.; TSAI, I. C.; QINGYANG, H.; CHI, S. Y.; LIN, Y. C.; FU, T. M. Potential impacts of electric vehicles on air quality in Taiwan. **Science of the Total Environment**. 2016.

Programa Município VerdeAzul PMVA. **Secretaria de Infraestrutura e Meio Ambiente**. 2017.

Qualidade do Ar no Estado de São Paulo. **Companhia Ambiental do Estado de São Paulo**. 2018.

Região Metropolitana de São Paulo. **Empresa Paulista de Planejamento Metropolitana S/A**. 2017.

RIVERS, N.; SABERIAN, S.; SCHAUFLELE, B. Public Transit and Air Pollution. **Unpublished Working Paper**. 2017.

SORET, A.; GUEVARA, M.; BALDASANO, J.M. The potential impacts of electric vehicles on air quality in the urban areas of Barcelona and Madrid (Spain). **Atmospheric Environment**. 2014.

STUCCHI, D. Can public transit subsidies be warranted for improving air quality and health outcomes? Evidence from the São Paulo Metropolitan Area for a second-best policy. **Escola de Administração de Empresas de São Paulo da Fundação Getúlio Vargas**. 2018.

Understanding the Electric Vehicle Landscape To 2020. **Global Electric Vehicles Outlook**. 2013.

VAZ, L. F. H.; BARROS, D. C.; CASTRO, B. H. R. Veículos híbridos e elétricos: sugestões de políticas públicas para o segmento. **Banco Nacional do Desenvolvimento Econômico e Social**. 2018.