



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
“JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
Instituto de Ciência e Tecnologia
Câmpus de Sorocaba

PEDRO DE OLIVEIRA MASETTI

**DETERMINANTES SOCIOECONÔMICOS DAS EMISSÕES DE GASES DE
EFEITO ESTUFA NO ESTADO DE SÃO PAULO: UMA ANÁLISE EM DADOS EM
PAINEL (2003–2020)**

Sorocaba

2026

PEDRO DE OLIVEIRA MASETTI

**DETERMINANTES SOCIOECONÔMICOS DAS EMISSÕES DE GASES DE
EFEITO ESTUFA NO ESTADO DE SÃO PAULO: UMA ANÁLISE EM DADOS EM
PAINEL (2003–2020)**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado à Universidade Estadual
Paulista (UNESP), Instituto de Ciência e
Tecnologia, Sorocaba, como parte dos
requisitos para obtenção do grau de
Bacharel em Engenharia Ambiental.

Orientadora: Dra. Liliane Moreira Nery

Coorientador: Prof. Dr. Darllan Collins da
Cunha e Silva

Sorocaba

2026

M396d Masetti, Pedro de Oliveira

Determinantes socioeconômicos das emissões de gases de efeito estufa no estado de São Paulo: Uma análise em dados em painel (2003-2020) / Pedro de Oliveira Masetti. -- Sorocaba, 2026

41 p. : il., tabs., mapas

Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado - Engenharia Ambiental) - Universidade Estadual Paulista (UNESP), Instituto de Ciência e Tecnologia, Sorocaba

Orientadora: Lilliane Moreira Nery

Coorientador: Darllan Collins da Cunha e Silva

1. Gases estufa. 2. Econometria. 3. Indicadores sociais. I. Título.

PEDRO DE OLIVEIRA MASETTI

**DETERMINANTES SOCIOECONÔMICOS DAS EMISSÕES DE GASES DE
EFEITO ESTUFA NO ESTADO DE SÃO PAULO: UMA ANÁLISE EM DADOS EM
PAINEL (2003–2020)**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Instituto de Ciência e Tecnologia de Sorocaba, Universidade Estadual Paulista (UNESP), como parte dos requisitos para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Ambiental.

Data da defesa: 30/03/2026

BANCA EXAMINADORA:

Liliane Moreira

Dr. Liliane Moreira Nery

UNESP – Instituto de Ciência e Tecnologia – Campus de Sorocaba

Jose Arnaldo Frutuoso Roveda

Prof. Dr. José Arnaldo Frutuoso Roveda

UNESP – Instituto de Ciência e Tecnologia – Campus de Sorocaba

Nicholas N.

Me. Nicholas de Paula Nicomedes

UNESP – Instituto de Ciência e Tecnologia – Campus de Sorocaba

RESUMO

As mudanças climáticas figuram entre os principais desafios contemporâneos, estando diretamente associadas ao aumento das emissões de gases de efeito estufa (GEEs) provenientes das atividades humanas. Nesse cenário, o Estado de São Paulo destaca-se por sua relevância econômica e pela elevada heterogeneidade socioeconômica entre seus municípios, o que o torna um objeto de estudo adequado para a análise das relações entre desenvolvimento e emissões ambientais. Este trabalho tem como objetivo analisar os determinantes socioeconômicos das emissões de dióxido de carbono equivalente (CO_2eq) nos municípios paulistas, no período de 2003 a 2020. Para tanto, utiliza-se uma abordagem quantitativa baseada em dados em painel e na aplicação do modelo STIRPAT (*Stochastic Impacts by Regression on Population, Affluence and Technology*), estimado por meio de regressões com efeitos fixos. As variáveis explicativas consideradas incluem o valor adicionado da indústria, a frota de veículos de passeio, o produto interno bruto (PIB) per capita, a população residente e a densidade demográfica, todas transformadas em logaritmo natural. Os resultados indicam que a frota de veículos exerce impacto positivo e estatisticamente significativo sobre as emissões de CO_2eq , evidenciando o papel central do setor de transportes. Em contrapartida, o valor adicionado da indústria apresenta coeficiente levemente negativo, sugerindo ganhos de eficiência produtiva e possível desacoplamento entre crescimento industrial e emissões em certas localidades. Adicionalmente, observou-se elevada concentração espacial das emissões em poucos municípios do Estado.

Palavras-chave: Emissões de carbono; Gases de efeito estufa; Dados em painel; STIRPAT; São Paulo.

ABSTRACT

Climate change is one of the most pressing global challenges and is closely related to the increase in greenhouse gas (GHG) emissions resulting from human activities. In this context, the State of São Paulo stands out due to its economic relevance and pronounced socioeconomic heterogeneity among municipalities, making it an appropriate case for analyzing the relationship between development and environmental emissions. This study aims to examine the socioeconomic determinants of carbon dioxide equivalent (CO₂eq) emissions across municipalities in the state of São Paulo between 2003 and 2020. A quantitative approach based on panel data is employed, using the STIRPAT (Stochastic Impacts by Regression on Population, Affluence and Technology) model estimated through fixed effects regressions. The explanatory variables include industrial value added, passenger vehicle fleet, gross domestic product (GDP) per capita, resident population, and population density, all expressed in natural logarithms. The results indicate that the expansion of the vehicle fleet has a positive and statistically significant impact on CO₂eq emissions, highlighting the central role of the transport sector. Conversely, industrial value added shows a negative coefficient, suggesting productivity gains and a potential decoupling between industrial growth and emissions in certain places. Additionally, the findings reveal a strong spatial concentration of emissions among a small number of municipalities within the State.

Keywords: Carbon emissions; Greenhouse gases; Panel data; STIRPAT; São Paulo.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Correlação entre a participação populacional e a participação nas emissões globais de CO ₂ por país (2023) - escala logarítmica	9
Figura 2 - Distribuição dos países com maiores volumes absolutos de emissão de GEEs em 2023 (bilhões de toneladas de CO ₂ equivalente).....	13
Figura 3 - Série temporal das emissões brasileiras de GEEs por categoria setorial .	14
Figura 4 - Distribuição percentual das emissões de GEEs por categoria setorial no Brasil e no Estado de São Paulo (2023)	15
Figura 5 - Distribuição espacial da média anual de emissões de CO ₂ eq nos municípios 7aulistas (2003–2020).....	28
Figura 6 - Curva de Lorenz aplicada nos municípios estudados para concepção das suas heterogeneidades	29
Figura 7 - Mapas comparativos da variação (2003–2020) em base logarítmica: (a) emissões; (b) PVA industrial; (c) frota de veículos	34
Figura 8 - Gráfico de dispersão da variação logarítmica das emissões versus variação do PVA industrial (2003–2020).....	35
Figura 9 - Gráfico de dispersão da variação logarítmica das emissões versus variação da frota de veículos (2003–2020).....	35

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Marcos e compromissos climáticos do Estado de São Paulo.	16
Tabela 2 - Evolução das emissões líquidas de GEE por setor no Estado de São Paulo (2005–2020).....	17
Tabela 3 – Variáveis utilizadas na análise econométrica e respectivas fontes	24
Tabela 4 - Análise descritiva do database estudado	27
Tabela 5 - Resultados do modelo Pooled OLS	30
Tabela 6 - Resultados do modelo Efeitos Aleatórios (RE)	30
Tabela 7 - Resultados do modelo Efeitos Fixos (FE)	31
Tabela 8 - Testes de seleção do modelo econométrico para dados em painel.....	33

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

AR6	Sixth Assessment Report
C40	Climate Leadership Group
CETESB	Companhia Ambiental do Estado de São Paulo
CNPq	Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico
CO ₂	Dióxido de carbono
CO ₂ eq	Dióxido de carbono equivalente
DENATRAN	Departamento Nacional de Trânsito
EKC	Environmental Kuznets Curve
FE	Fixed Effects (Efeitos Fixos)
GEE	Gás de Efeito Estufa
GHG	Greenhouse Gas
IPAT	Impact = Population × Affluence × Technology
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
IPVA	Imposto sobre a Propriedade de Veículos Automotores
LM	Lagrange Multiplier
OLS	Ordinary Least Squares
PACS	Plano de Ação Climática de Santos
PEE 2050	Plano Estadual de Energia 2050
PEMC	Política Estadual de Mudanças Climáticas
PIB	Produto Interno Bruto
PMG0-ARDL	Pooled Mean Group – Autoregressive Distributed Lag
PVA	Produto/Valor Adicionado
RE	Random Effects (Efeitos Aleatórios)
SEADE	Fundação Sistema Estadual de Análise de Dados
SEEG	Sistema de Estimativas de Emissões de Gases de Efeito Estufa
SIMA	Secretaria de Infraestrutura e Meio Ambiente
SO ₂	Dióxido de enxofre
STIRPAT	Stochastic Impacts by Regression on Population, Affluence and Technology

LISTA DE SÍMBOLOS

a	Constante da equação
b, c, d	Parâmetros estimáveis do modelo STIRPAT
$\beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4, \beta_5$	Coeficientes estimados das variáveis explicativas
ε_{it}	Termo de erro
I	Impacto ambiental
P	População
A	Afluência econômica
T	Tecnologia
Em_{it}	Emissões anuais de CO ₂ eq do município i no ano t
PVA_{it}	Valor adicionado da indústria do município i no ano t
Fr_{it}	Frota de veículos do município i no ano t
PIB_{it}	Produto Interno Bruto per capita do município i no ano t
Pop_{it}	População residente do município i no ano t
$Dens_{it}$	Densidade demográfica do município i no ano t
i	Unidade espacial (município)
t	Unidade temporal (ano)
$\ln$	Logaritmo natural

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	9
2	OBJETIVOS.....	12
2.1	Objetivo geral	12
2.2	Objetivos específicos	12
3	REVISÃO DE LITERATURA	13
3.1	Cenário histórico de emissões no Brasil e o Estado de São Paulo	13
3.2	Modelos explicativos da relação entre variáveis socioeconômicas e emissões.....	18
3.3	Uso de modelos econométricos para constatação da correlação entre as variáveis.....	20
4	MATERIAIS E MÉTODOS	23
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	27
5.1	Análise descritiva das variáveis	27
5.2	Resultados dos modelos econométricos	29
5.3	Análises de suporte e exemplos.....	33
6	CONCLUSÃO	38
	REFERÊNCIAS	39

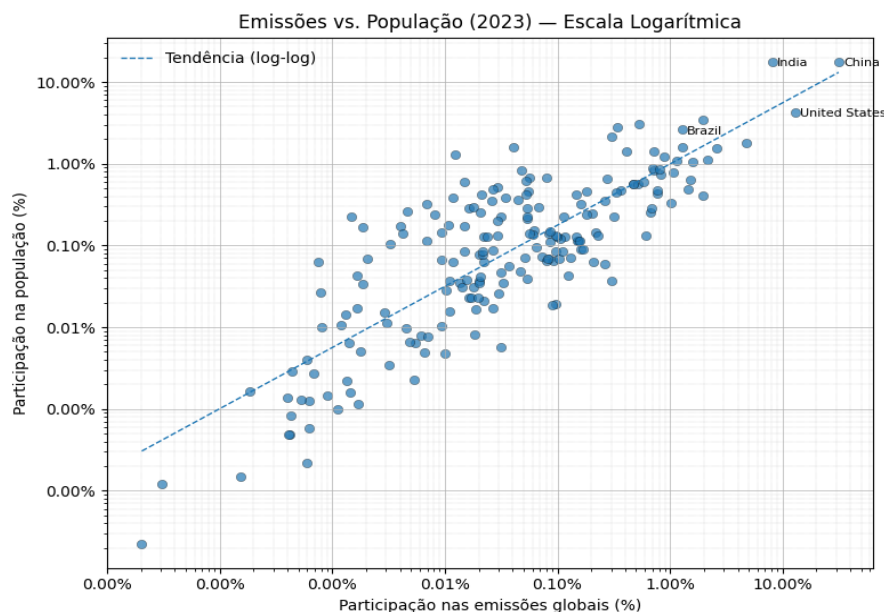
1 INTRODUÇÃO

Desde a Revolução Industrial, o mundo tem experimentado um crescimento econômico e populacional acelerado, acompanhado por um aumento expressivo nas emissões de gases de efeito estufa (GEEs). A relação entre o crescimento da população mundial e o aumento das emissões de dióxido de carbono (CO₂), principal GEE de origem antrópica, é amplamente reconhecida (Gurgel et al., 2019).

Estima-se que, entre 1950 e 2020, a população global tenha aumentado mais de três vezes, enquanto as emissões globais de CO₂ cresceram quase sete vezes no mesmo período. Essa forte correlação entre população e emissões pode ser observada também quando se analisa a distribuição desses fatores entre países (Our World in Data, 2023).

Em 2023, a correlação de Pearson entre a participação populacional e a participação nas emissões globais chega perto de 95% (Figura 1). Esse dado reforça a existência de uma associação direta entre dinâmicas demográficas, produtivas e ambientais, cuja complexidade ainda carece de investigação aprofundada, especialmente quando se busca compreender essas relações em níveis regionais e locais, à luz das distintas trajetórias de desenvolvimento.

Figura 1 - Correlação entre a participação populacional e a participação nas emissões globais de CO₂ por país (2023), em escala logarítmica.



Fonte: Elaboração própria com base em dados de Our World in Data, 2023.

(<https://ourworldindata.org/grapher/share-co2-emissions-vs-population>).

Frente à intensificação dos impactos climáticos, diversas ações têm sido articuladas no plano internacional para mitigar as emissões de GEEs. O Acordo de Paris, firmado em 2015, estabeleceu metas ambiciosas para a redução das emissões globais e o limite do aumento da temperatura média do planeta em até 1,5 °C (Gurgel et al., 2019).

O Brasil, como país signatário, apresenta compromissos relativamente alinhados com as metas globais, embora ainda enfrente desafios significativos de implementação nos setores de energia e uso da terra (van Soest et al., 2017) e de articulação de políticas climáticas de forma transversal e economicamente viável (Gurgel et al., 2019). No contexto nacional, instrumentos como o Plano Nacional sobre Mudança do Clima (PNMC), os Inventários Nacionais de Emissões e políticas estaduais vêm sendo implementados como parte desse esforço para um crescimento socioeconômico mais sustentável.

O Estado de São Paulo, sendo o mais populoso e economicamente relevante do país, ocupa um papel central nesse cenário. Sua estrutura produtiva é marcada por uma elevada concentração industrial e por um setor de serviços altamente desenvolvido, ao lado de regiões com forte presença do agronegócio e áreas ainda em processo de urbanização. Esse mosaico de realidades econômicas e territoriais entre os municípios paulistas impõe um desafio à formulação de políticas climáticas uniformes (PEMC, 2009).

Observar as emissões em escala municipal permite investigar como diferentes estruturas socioeconômicas influenciam o perfil de emissões e, mais especificamente, até que ponto a geração de renda local está atrelada a atividades com alto impacto ambiental (Polloni-Silva et al., 2021; Gurgel et al., 2019).

Apesar da ampla documentação da relação entre variáveis socioeconômicas e emissões de GEEs em nível nacional, os estudos que exploram essa dinâmica com recorte municipal ainda são escassos no contexto brasileiro (Silva et al., 2015). Essa ausência é especialmente significativa quando se considera a heterogeneidade dos municípios em termos de estrutura econômica, densidade populacional, atividades predominantes e capacidade institucional. A escala municipal, embora frequentemente negligenciada, é fundamental para compreender como fatores locais contribuem para o padrão agregado das emissões, permitindo análises mais refinadas e ajustadas à realidade territorial (Polloni-Silva et al., 2021).

Além da escala espacial, o recorte temporal representa outro aspecto crítico para análises consistentes. Estudos ambientais utilizam recortes estáticos, ignorando a evolução das variáveis ao longo do tempo (Lv; Li, 2021). O uso de dados em painel, que combinam variabilidade entre unidades espaciais e ao longo dos anos, permite controlar efeitos não observáveis específicos de cada município, além de identificar tendências temporais comuns. Essa abordagem é particularmente relevante para estudos ambientais, dado que políticas públicas, mudanças tecnológicas e ciclos econômicos tendem a influenciar as emissões de forma dinâmica.

Este trabalho está organizado em cinco seções, além desta introdução. A Seção 2 contempla os objetivos do trabalho, a Seção 3 apresenta a revisão da literatura, abordando os principais estudos e marcos teóricos relacionados às emissões de GEE e suas relações com variáveis socioeconômicas, com destaque para o modelo STIRPAT (*Stochastic Impacts by Regression on Population, Affluence, and Technology*).

A Seção 4 descreve os dados utilizados, as variáveis selecionadas e os procedimentos metodológicos adotados na análise econométrica, incluindo os testes aplicados e os critérios de escolha do modelo. Na Seção 5 são apresentados os resultados obtidos, com a interpretação dos coeficientes estimados, análise das elasticidades e discussão à luz do contexto municipal paulista. Por fim, a Seção 6 reúne as conclusões do estudo, destacando as principais contribuições, limitações encontradas e sugestões para pesquisas futuras.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Analisar a relação entre variáveis socioeconômicas e as emissões de GEEs nos municípios do Estado de São Paulo, entre 2003 e 2020, por meio da aplicação de modelos econométricos de dados em painel, buscando compreender como o desenvolvimento local se associou historicamente aos níveis de emissão ao longo do tempo.

2.2 Objetivos específicos

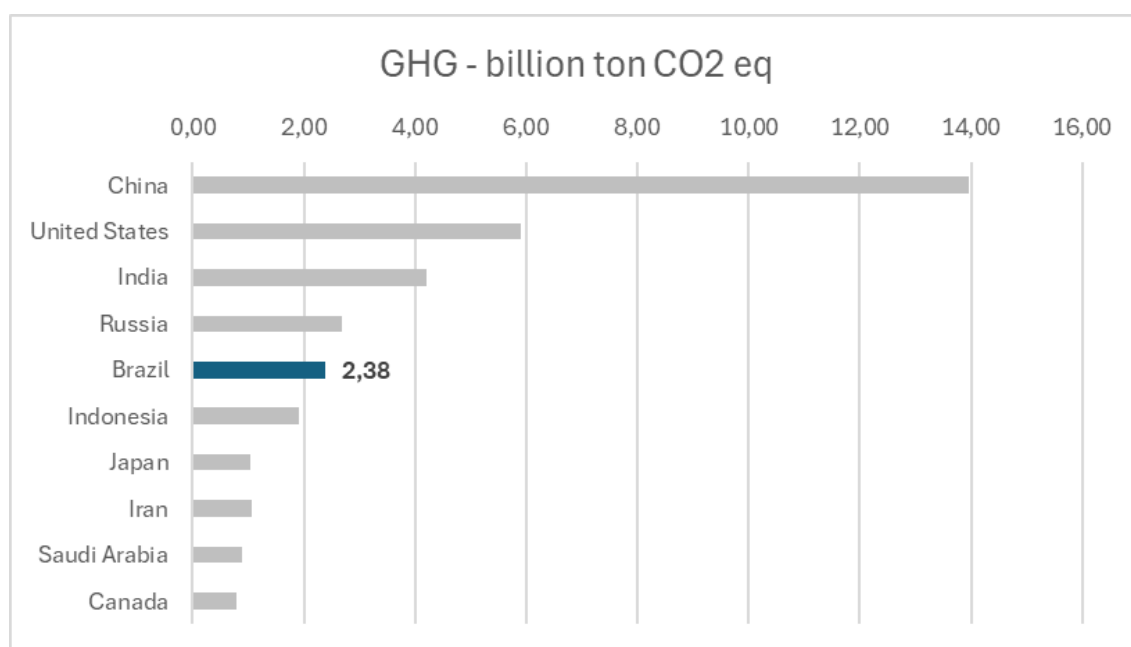
- Construir uma base de dados estruturada em painel com indicadores de emissões e variáveis socioeconômicas municipais (PIB per capita, valor adicionado da indústria, frota de veículos, população residente e densidade demográfica).
- Aplicar o modelo STIRPAT por meio de diferentes especificações econométricas (pooled OLS, efeitos fixos e aleatórios) e selecionar a mais adequada com base em testes estatísticos.
- Estimar as elasticidades entre variáveis de PIB per capita, valor adicionado por setor e população residente em relação às emissões de GEE.
- Avaliar a influência de fatores estruturais locais sobre os padrões históricos de emissão nos municípios paulistas.

3 REVISÃO DE LITERATURA

3.1 Cenário histórico de emissões no Brasil e o Estado de São Paulo

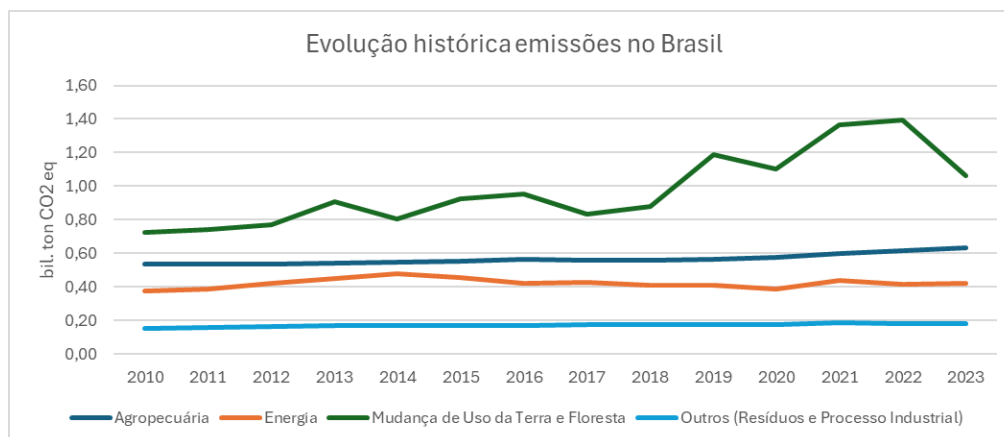
O comportamento histórico das emissões de GEEs no Brasil reflete um processo complexo de transformações socioeconômicas, expansão territorial e mudanças no padrão de uso da terra (Observatório do Clima, 2024). Nas últimas décadas, como pode ser observado na Figura 2, o país consolidou-se entre os principais emissores globais, com destaque para setores como agropecuária e mudanças no uso do solo (Figura 3). Segundo os Inventários Nacionais de Emissões, o Brasil apresentou variações significativas ao longo do tempo, com picos associados à intensificação do desmatamento e ao crescimento da frota de veículos (IPCC, 2022).

Figura 2 - Distribuição dos países com maiores volumes absolutos de emissão de GEEs em 2023, em bilhões de toneladas de CO₂ equivalente



Fonte: Elaboração própria com base em dados de Our World in Data, 2023.
(<https://ourworldindata.org/grapher/share-co2-emissions-vs-population>).

Figura 3 - Série temporal das emissões brasileiras de GEEs por categoria setorial

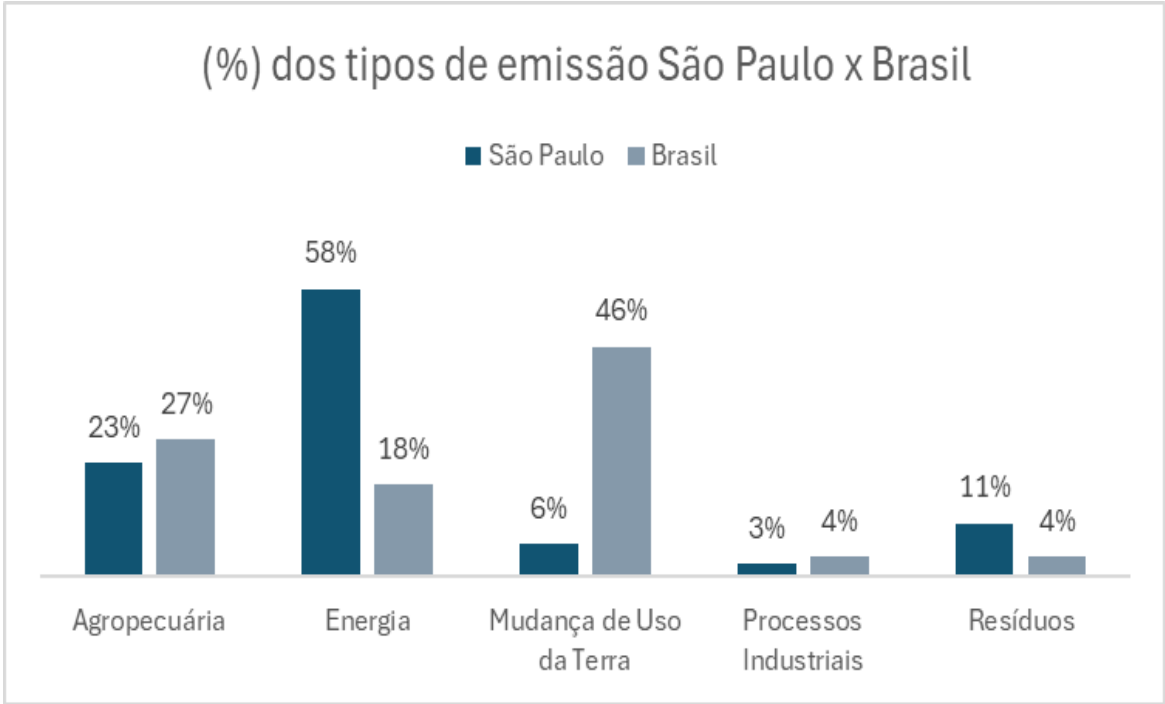


Fonte: Elaboração própria com dados do SEEG (2023).

(<https://seeg.eco.br/>).

Embora o desmatamento da Amazônia concentre atenção nos debates nacionais e internacionais, estados do Sudeste, como São Paulo, têm perfil de emissões estruturalmente diferente do nacional, como evidenciado na Figura 4. Perfil esse marcado por fontes relacionadas ao setor energético, com ênfase em transportes e atividades industriais urbanas (Observatório do Clima, 2024). Essa distinção é explicada pela alta densidade populacional, pelo papel central da indústria na economia paulista e pela concentração de centros urbanos com demanda energética elevada (Gurgel et al., 2019).

Figura 4 - Distribuição percentual das emissões de gases de efeito estufa por categoria setorial no Brasil e no Estado de São Paulo em 2023.



Fonte: Elaboração própria com dados do SEEG (2024).
(<https://seeg.eco.br/>).

Essa disparidade entre os padrões de emissão nacionais e estaduais levou São Paulo a formular estratégias complementares às metas federais de descarbonização. Desde meados dos anos 2000, o Estado passou a adotar compromissos próprios de mitigação, que envolvem metas de redução de emissões, planos setoriais e mecanismos de monitoramento territorializado (PEMC, 2022). A Tabela 1 apresenta, de forma resumida, esses marcos e compromissos estabelecidos pelo Estado de São Paulo ao longo das últimas décadas.

Tabela 1 - Marcos e compromissos climáticos do Estado de São Paulo.

Ano	Plano / Política	Meta associada ou destaque operacional
2009	Política Estadual de Mudanças Climáticas (PEMC)	Institui a política climática do Estado de São Paulo (Lei nº 13.798/2009), estabelecendo a meta de reduzir 20% das emissões até 2020 (base 2005).
2015	Acordo de Cooperação com C40 Cities	Integra São Paulo à rede global de cidades comprometidas com metas de mitigação e adaptação climática, com foco em mobilidade urbana sustentável e eficiência energética.
2022	SP Carbono Neutro 2050	Compromisso de neutralidade de emissões até 2050, articulando ações de longo prazo nos setores produtivo, energético e urbano.
2024	Plano Estadual de Energia 2050 (PEE 2050)	Atualiza as diretrizes energéticas do Estado, projetando a transição para uma matriz energética de baixo carbono até 2050.

Fonte: Elaboração própria com base em dados da CETESB (2022), Governo do Estado de São Paulo (2020) e Secretaria de Infraestrutura e Meio Ambiente de SP (2021).

A Política Estadual de Mudanças Climáticas (PEMC) representou um marco para o Estado de São Paulo, ao estabelecer o compromisso institucional frente ao desafio das mudanças climáticas globais (PEMC, 2009). Entretanto, o Estado não conseguiu atingir a meta de reduzir em 20% suas emissões líquidas até 2020, em relação aos níveis de 2005. Segundo o relatório de 10 anos da PEMC, a redução efetiva foi de apenas 2,1%, evidenciando o descompasso entre os compromissos assumidos e a efetividade das ações implementadas (PEMC, 2022).

Como detalhado na Tabela 02, setores como “Mudança no Uso da Terra” e “Processos Industriais e Uso de Produtos” apresentaram quedas expressivas (-73,0% e -69,7%, respectivamente). No entanto, o setor de energia, principal fonte de emissões no Estado, teve um aumento de 24,3% no período, ampliando sua participação de 42,5% para 53,3% das emissões brutas.

Tabela 2 - Evolução das emissões líquidas de GEE por setor no Estado de São Paulo (2005–2020)

Setor	Emissões 2005 (MtCO₂eq)	Emissões 2020 (MtCO₂eq)	Variação absoluta (MtCO₂eq)	Variação percentual (%)
Agropecuária	38,7	35,2	-3,50	-9,0%
Energia	60,8	75,5	14,70	24,2%
Mudança no Uso da Terra	8,5	2,3	-6,20	-72,9%
Resíduos	15,2	17,4	2,20	14,5%
Processos Industriais e Uso de Produtos	14,6	4,4	-10,20	-69,9%
Total (emissões líquidas)	137,8	134,8	-3,00	-2,2%

Fonte: Elaboração própria com base em dados do relatório de 10 anos da Política Estadual de Mudanças Climáticas – PEMC (2022).

Como destaca Oppermann (2017), a ausência de integração sistêmica entre os instrumentos da PEMC e a falta de métricas claras e vinculantes contribuíram para a fragmentação das ações climáticas paulistas ao longo da última década. Esse histórico reforça a importância de desenhar políticas com metas setoriais bem definidas, coerência interna e mecanismos de monitoramento que permitam identificar gargalos e reorientar estratégias conforme necessário.

Nesse sentido, o governo estadual passou a desenvolver instrumentos mais específicos, como o Plano Estadual de Energia (PEE), que visa enfrentar os desafios do setor energético, promovendo a diversificação da matriz e a transição para fontes menos emissoras (PEE, 2022). Outro exemplo é o Projeto de Lei nº 1510/2023, que propõe a isenção do Imposto sobre a Propriedade de Veículos Automotores (IPVA) para veículos elétricos, como forma de incentivar a descarbonização da frota estadual.

Todavia, os resultados apresentados pelo relatório da PEMC em 2022 mostram que o Estado ainda se encontra distante das metas estabelecidas, um reflexo das fragilidades na formulação e implementação da política, conforme já havia sido alertado por Oppermann (2017). Isso reforça a relevância de estudos que auxiliem na

identificação de setores-chave e no direcionamento de medidas mais eficazes para a mitigação das emissões de GEEs.

3.2 Modelos explicativos da relação entre variáveis socioeconômicas e emissões

A compreensão dos perfis setoriais de emissão, como os observados no Brasil e no Estado de São Paulo, tem sido fundamental não apenas para orientar políticas públicas, mas também para fundamentar o desenvolvimento de modelos explicativos que buscam captar as relações causais entre variáveis socioeconômicas e emissões de gases de efeito estufa.

Nesse contexto, emergem abordagens teóricas como o modelo STIRPAT, que vêm sendo aplicadas em diferentes escalas e contextos, desde estudos internacionais comparando padrões entre países (Liddle, 2015; Liddle; Hutington 2020; Lv et al., 2020), até análises em nível nacional, como no caso brasileiro (Silva et al., 2015), para investigar como fatores como renda, população e estrutura econômica influenciam o comportamento das emissões ao longo do tempo.

A relação entre o desenvolvimento socioeconômico e os impactos ambientais começou a ser sistematizada a partir do modelo IPAT (Impacto, População, Afluência e Tecnologia), formulado por Ehrlich e Holdren (1971), por meio da equação $I = P \times A \times T$.

Nessa expressão, I representa o impacto ambiental (como as emissões de GEEs), P é a população, A a afluência econômica (geralmente medida pelo PIB per capita) e T o nível tecnológico. A fórmula destaca que o impacto ambiental é produto de múltiplos fatores humanos, sintetizando uma visão integrada da pressão exercida sobre os ecossistemas.

Apesar de seu valor conceitual, o modelo IPAT possui limitações empíricas. A equação assume proporcionalidade rígida entre os fatores, dificultando análises estatísticas mais flexíveis. Para superar essa limitação, Dietz e Rosa (1994) propuseram o modelo STIRPAT (*Stochastic Impacts by Regression on Population, Affluence and Technology*), uma reformulação estocástica do IPAT. Essa nova abordagem permite estimar elasticidades e avaliar o peso relativo de cada variável sobre o impacto ambiental, por meio de técnicas de regressão. A equação básica do STIRPAT pode ser observada na Equação 1.

$$I = a \cdot P^b \cdot A^c \cdot T^d \cdot e \quad (1)$$

Onde:

Os expoentes b , c e d são parâmetros estimáveis;

a é uma constante;

e representa o erro aleatório.

A aplicação logarítmica dessa equação viabiliza seu uso em modelos lineares de regressão múltipla com dados em corte transversal, séries temporais ou painéis. Desde sua formulação, o STIRPAT tem sido amplamente empregado em estudos que buscam entender o papel da demografia, da economia e da estrutura tecnológica na geração de impactos ambientais.

No âmbito internacional, estudos como o de Dong et al. (2020) buscaram compreender como o crescimento econômico e demográfico influencia as emissões de GEE, especialmente diante das diferenças estruturais entre países desenvolvidos e em desenvolvimento.

Dong et al. (2020) utilizaram o modelo STIRPAT como ferramenta para estimar a elasticidade das variáveis socioeconômicas frente às emissões de CO₂, testando a hipótese de que o papel da renda e da urbanização varia conforme o estágio de desenvolvimento econômico. A análise foi conduzida com dados em painel, permitindo capturar tanto diferenças entre países quanto tendências temporais.

Os resultados indicaram que a elasticidade da população se manteve positiva e relativamente estável, sugerindo uma relação estrutural entre crescimento demográfico e emissões. Já os efeitos da renda e da urbanização foram mais heterogêneos, com impacto mais intenso nos países em estágio intermediário de desenvolvimento.

Em economias avançadas, Dong et al. (2020) observaram uma desaceleração dos efeitos da afluência sobre as emissões, associada a processos de transição tecnológica e políticas ambientais mais rigorosas. O estudo reforça a flexibilidade do modelo STIRPAT para capturar essas dinâmicas contextuais.

Mesmo em uma escala menor, no contexto estadual paulista, um comportamento semelhante pode ser observado. Polloni-Silva et al. (2021) aplicaram o modelo STIRPAT para investigar a relação entre desenvolvimento econômico e

emissões de CO₂ nos municípios de São Paulo, buscando evidências da Curva de Kuznets Ambiental (EKC). O estudo parte da premissa de que, à medida que a renda aumenta, as emissões tendem a crescer até certo ponto, após o qual começam a declinar, refletindo um possível desacoplamento entre crescimento e impacto ambiental.

Os resultados indicaram uma relação não linear entre o PIB per capita e as emissões, com evidências de inflexão em municípios mais desenvolvidos. Além disso, o setor agropecuário e a densidade populacional se mostraram variáveis explicativas relevantes, apontando que as dinâmicas territoriais e produtivas locais influenciam diretamente o padrão de emissões.

Apesar das diferenças de escala, os dois estudos apresentam resultados semelhantes quanto ao papel da renda nas emissões. Tanto Dong et al. (2020), entre países, quanto Polloni-Silva et al. (2021), entre municípios paulistas, identificaram comportamentos não lineares do PIB per capita.

Em ambos os contextos, a afluência exerce maior influência sobre as emissões em estágios intermediários de desenvolvimento, desacelerando em níveis mais altos. Essa convergência sugere que fatores como maturidade econômica, mudanças tecnológicas e políticas ambientais contribuem para modular essa relação em diferentes realidades territoriais.

Esses achados reforçam a versatilidade do modelo STIRPAT como ferramenta analítica para compreender os determinantes das emissões em múltiplas escalas. Sua estrutura flexível permite adaptar o modelo às particularidades de cada contexto, mantendo coerência teórica e rigor empírico.

3.3 Uso de modelos econométricos para constatação da correlação entre as variáveis

A análise das emissões de GEE frente a variáveis socioeconômicas exige ferramentas estatísticas que captem simultaneamente as diferenças estruturais entre unidades territoriais e suas transformações ao longo do tempo. Nesse sentido, os modelos econométricos para dados em painel se apresentam como uma abordagem amplamente reconhecida, pois permitem explorar relações causais enquanto controlam fatores não observáveis específicos de cada unidade de análise (Custódio, 2024).

Nesse contexto, o referencial teórico STIRPAT fornece uma estrutura conceitual robusta para definir os fatores explicativos das emissões, enquanto os modelos de regressão para dados em painel viabilizam a estimação empírica dessas relações (Jedyn et al., 2025). A estocasticidade inerente a esse modelo é um diferencial importante: diferentemente de abordagens determinísticas exatas, ela reconhece que os impactos ambientais estão sujeitos a variações aleatórias e termos de erro, aproximando a análise da complexidade do mundo real (Dietz; Rosa, 1994).

Por sua vez, os modelos de regressão para dados em painel viabilizam a estimação empírica dessas relações, frequentemente por meio do cálculo de elasticidades (Custódio, 2024; Jedyn et al., 2025). Na econometria, a elasticidade é uma medida que quantifica a sensibilidade de uma variável em resposta a outra (Custódio, 2024; Jedyn et al., 2025), ou seja, permite avaliar, em termos percentuais, o quanto as emissões aumentam ou diminuem frente a uma variação de 1% na renda ou na população, por exemplo. A combinação entre ambos permite capturar a heterogeneidade espacial e a dinâmica temporal das variáveis socioeconômicas, garantindo maior precisão na identificação de padrões de impacto ambiental (Jedyn et al., 2025).

Um modelo econométrico amplamente utilizado pela sua simplicidade é o pooled OLS, que aplica a regressão linear clássica como se todos os dados pertencessem a uma única amostra, desconsiderando a estrutura de painel. Essa abordagem parte do pressuposto de que não há diferenças sistemáticas entre as unidades analisadas e que as variações observadas nas emissões podem ser integralmente explicadas pelas variáveis incluídas no modelo (Vilema-Escudero; Manyá-Orellana, 2025).

Embora útil como ponto de partida e para fins comparativos, o modelo pooled tende a ignorar heterogeneidades não observáveis entre as unidades, o que pode resultar em estimativas viesadas e interpretações limitadas quando há diferenças estruturais relevantes entre os municípios (Vilema-Escudero; Manyá-Orellana, 2025).

O modelo de efeitos aleatórios (RE) surge como alternativa ao modelo de efeitos fixos quando se assume que as características específicas das unidades de análise são aleatórias e não correlacionadas com os regressores. Essa suposição permite ganhos de eficiência na estimação, especialmente em amostras com muitas unidades e poucas observações por unidade (Custódio, 2024).

Em um estudo sobre países da Europa Oriental, Palla (2025) emprega o modelo RE para analisar o impacto de variáveis econômicas sobre as emissões de CO₂, destacando sua utilidade quando se busca generalização dos resultados e há menor risco de viés por omissão de variáveis estruturais. No entanto, o estudo também reforça que, se essa suposição não se sustentar, o RE pode produzir estimativas inconsistentes, exigindo cautela em sua aplicação.

Nesse contexto, estudos econométricos exigem testes que auxiliem a escolha do melhor modelo. Shahbaz, Nasir e Roubaud (2018) demonstram, em seu estudo sobre determinantes das emissões de CO₂, a importância de aplicar o teste de Hausman como ferramenta decisiva nessa seleção.

O teste verifica se há correlação entre os efeitos não observáveis e os regressores: quando tal correlação está presente, o modelo FE é preferível por garantir consistência; caso contrário, o RE é mais eficiente (Shahbaz; Nasir; Roubaud, 2018). Essa decisão metodológica, como destacam os autores, tem impacto direto na validade das inferências empíricas, especialmente em estudos com elevada heterogeneidade entre unidades, como municípios ou países (Shahbaz; Nasir; Roubaud, 2018).

4 MATERIAIS E MÉTODOS

A partir desse referencial teórico, este estudo buscou investigar empiricamente as relações entre variáveis socioeconômicas e as emissões de GEE no Estado de São Paulo, com base na aplicação de modelos econométricos. A análise utiliza dados em painel, permitindo capturar tanto a variação temporal quanto as especificidades entre os municípios paulistas.

A base de dados deste estudo é composta por informações que abrange os 645 municípios do estado de São Paulo, em um recorte temporal de 2003 a 2020. Ao todo, foram estruturadas 11.610 observações (645 municípios × 18 anos), sendo cada linha correspondente a um par município-ano.

Para cada observação, foram coletadas variáveis socioeconômicas e ambientais: emissões totais de CO₂ equivalente (em toneladas), PIB e o seu valor adicionado da indústria (PVA Industrial), frota de veículos de passeio, população total residente, densidade demográfica e PIB per capita.

A base final integra dados de diferentes fontes: (1) os indicadores econômicos e populacionais foram obtidos a partir do sistema SEADE (Fundação Sistema Estadual de Análise de Dados); (2) os dados de emissões de CO₂ equivalente (CO₂eq) foram obtidos através do Projeto "Análise da correlação espacial por *deep learning* de taxas de morbimortalidade com indicadores associados às mudanças climáticas e socioeconômicas (Processo CNPq: 444734/2023-6)", disponibilizados em: <https://shorturl.at/PR76k>; e (3) informações sobre frota de veículos foram extraídas do Departamento Nacional de Trânsito (DENATRAN). O conjunto de dados foi estruturado em um painel balanceado, com observações anuais por município.

A estratégia adotada baseia-se na aplicação empírica de uma adaptação do modelo STIRPAT, que permite estimar elasticidades entre variáveis socioeconômicas e emissões de GEEs. A formulação estocástica do modelo possibilita avaliar o peso relativo de fatores como população, renda e atividade econômica sobre o impacto ambiental, considerando tanto variações entre os municípios quanto mudanças ao longo do tempo (Dietz; Rosa, 1994).

A escolha das variáveis foi suportada por estudos em escala global, como Lv et al. (2020) e Dong et al. (2020), que adotam variáveis como PIB, população e indicadores de atividade econômica e energética como principais determinantes das emissões.

Nesse sentido, as variáveis selecionadas neste estudo buscam reproduzir essa abordagem em escala municipal, adaptando-a à disponibilidade de dados no contexto brasileiro. Ressalta-se que a limitação na disponibilidade de dados desagregados impõe restrições à inclusão de outras variáveis ou um período maior de estudo.

A variável dependente foi definida como as emissões anuais de CO₂eq por município. Como variáveis independentes principais, utilizaram-se o valor adicionado da indústria e a frota de veículos de passeio, representando proxies de intensidade produtiva e crescimento urbano, respectivamente. Também foram incluídas outras variáveis, com o objetivo de capturar características estruturais dos municípios: o PIB per capita, a população total, e a densidade populacional. A Tabela 3 resume as variáveis utilizadas, suas unidades, fontes e papel no modelo.

Tabela 3 – Variáveis utilizadas na análise econométrica e respectivas fontes

Nome da variável	Tipo	Unidade	Fonte
Emissões de CO ₂ eq	Dependente	Toneladas	CNPq: 444734/2023-6
PVA industrial	Independente	R\$	SEADE
Frota de veículos	Independente	Número de Veículos	DENATRAN
PIB per capita	Controle	R\$/Habitante	SEADE
População residente	Controle	Habitantes	SEADE
Densidade demográfica	Controle	Habitantes/km ²	SEADE

Fonte: Organizado pelo autor.

Todas as variáveis quantitativas foram transformadas em logaritmo natural (ln). Essa transformação permite interpretar os coeficientes estimados como elasticidades, ou seja, indica a variação percentual nas emissões de CO₂eq associada a uma variação percentual nas variáveis explicativas.

Além disso, a log-transformação contribui para reduzir a assimetria das distribuições, melhorar a linearidade das relações e mitigar a influência de valores extremos, características desejáveis em modelos de regressão (Wooldridge, 2010). A fórmula da STIRPAT para esse estudo, já com o logaritmo natural aplicado, pode ser observada na Equação 2.

$$\ln(Emi_{it}) = \alpha + \beta_1 \ln(PVA_{it}) + \beta_2 \ln(Fr_{it}) + \beta_3 \ln(PIB_{it}) + \beta_4 \ln(Pop_{it}) + \beta_5 \ln(Dens_{it}) + \varepsilon_{it} \quad (2)$$

Onde:

Emi_{it} são as emissões anuais de CO_2eq por município i no ano t ;

PVA_{it} é o valor adicionado da indústria (proxy de afluência – intensidade produtiva);

Fr_{it} é o número de veículos de passeio (proxy de tecnologia – mobilidade);

PIB_{it} é o PIB per capita (proxy de afluência – produção econômica);

Pop_{it} é a população residente total (proxy de população – dimensão demográfica);

$Dens_{it}$ é a densidade demográfica (proxy de população – ocupação do território);

ε_{it} é o termo de erro.

A modelagem iniciou-se com a aplicação do modelo pooled OLS, adotado como referência inicial. No entanto, esse modelo assume que não há heterogeneidade entre as unidades, o que é improvável no contexto de municípios com estruturas socioeconômicas distintas.

Para verificar essa hipótese, utilizou-se o teste F, que compara pooled OLS com o modelo de efeitos fixos (FE). Também foi aplicado o teste de Breusch-Pagan (LM - Lagrange Multiplier), que compara pooled com efeitos aleatórios (RE). Por fim, o teste de Hausman foi utilizado para decidir entre FE e RE, com base na existência de correlação entre os efeitos individuais e os regressores (Wooldridge, 2010).

Após a seleção do modelo mais adequado, foram realizados testes de diagnóstico com o objetivo de verificar os principais pressupostos da regressão. Avaliou-se a presença de heterocedasticidade, autocorrelação serial e multicolinearidade entre os regressores, de modo a garantir a validade estatística dos resultados. Quando detectadas inconsistências, os erros padrão foram corrigidos por meio de agrupamento (cluster) por município, assegurando maior robustez às inferências realizadas.

Adicionalmente, foram utilizados a Curva de Lorenz e o coeficiente de Gini para avaliar a concentração das emissões de CO_2eq entre os municípios. A Curva de Lorenz representa graficamente a distribuição acumulada das emissões, enquanto o coeficiente de Gini sintetiza essa desigualdade em uma medida entre 0 e 1, em que valores mais elevados indicam maior concentração. Os indicadores foram calculados

com base na média das emissões anuais por município no período analisado, permitindo complementar a análise econométrica com uma avaliação da distribuição das emissões no estado.

Todas as análises foram conduzidas em Python, com destaque para as bibliotecas *pandas*, *numpy*, *matplotlib* e *seaborn* na manipulação e visualização dos dados. Os modelos econométricos foram estimados com suporte das bibliotecas *linearmodels* e *statsmodels*, utilizando-se a classe *PanelOLS* para a estimação dos modelos de regressão em painel. A metodologia adotada, conforme descrita, busca assegurar robustez estatística e coerência com os objetivos do estudo, cuja aplicação é detalhada na seção seguinte.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Análise descritiva das variáveis

A Tabela 4 apresenta as estatísticas descritivas dessas variáveis. Observa-se, em geral, uma alta dispersão entre os municípios, refletindo a heterogeneidade estrutural do estado. Destaca-se, por exemplo, a variável de emissões de CO₂eq, cuja média anual é de 208.806 toneladas, com desvio padrão elevado (704.670 toneladas), evidência de que poucos municípios concentram a maior parte das emissões.

Tabela 4 - Análise descritiva do database estudado

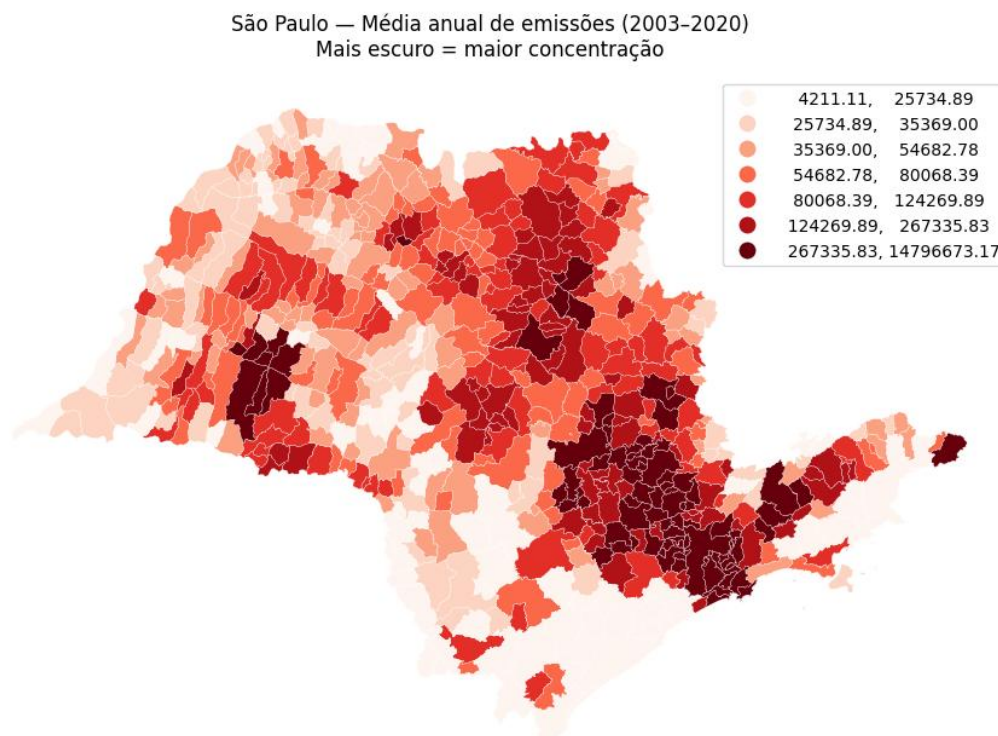
Nome da variável	Média	Desvio Padrão	Mínimo	Mediana	Máximo
Emissões de CO ₂ eq (ton)	208.806	704.670	3.516	63.921	20.282.636
PVA industrial (R\$)	453.493.288	2.400.937.775	204.482	30.949.342	66.893.050.096
PIB per capita (R\$)	23.286	24.215	2.606	17.501	449.725
Frota de Veículos	31.358	253.232	133	4.581	8.573.532
População residente	64.387	453.312	800	12.696	11.509.115
Densidade demográfica	305	1.206	4	38	13.284

Fonte: Organizado pelo autor.

A disparidade entre os municípios também pode ser constatada por meio da distribuição espacial. A Figura 5 apresenta a média anual de emissões por município ao longo do período analisado. Nota-se uma maior concentração nas regiões metropolitanas, na Baixada Santista, no Vale do Paraíba e em polos industriais do interior, como Sorocaba, Campinas e Ribeirão Preto. Em contraste, grande parte dos municípios do oeste e noroeste do estado apresenta níveis significativamente mais baixos.

Ainda assim, observa-se a presença de manchas pontuais de maior emissão no oeste paulista, que podem estar associadas à concentração de atividades agroindustriais, especialmente ligadas à cadeia sucroenergética, além da presença de polos logísticos e industriais específicos. Reforçando ainda mais a disparidade das emissões entre os municípios.

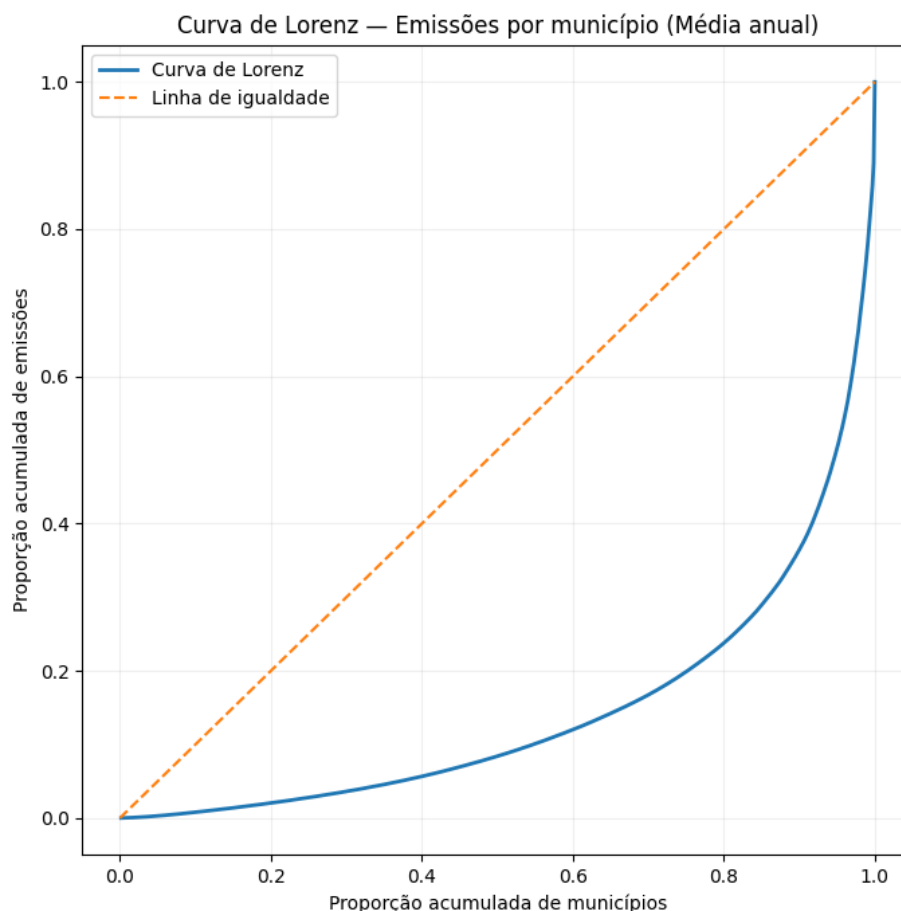
Figura 5 - Distribuição espacial da média de emissões no período estudado



Fonte: Organizado pelo autor.

Essa desigualdade é reforçada pela Curva de Lorenz (Figura 6) e pelos indicadores de concentração de emissões. O coeficiente de Gini, calculado com base na média de emissões anuais por município, foi de 0,712, valor considerado elevado, sinalizando forte concentração das emissões em poucos municípios (Cowell, 2011). De fato, os 10% dos municípios que mais emitem concentram 63,4% do total de emissões do Estado, enquanto o 1% mais poluente responde sozinho por cerca de 22%.

Figura 6 - Curva de Lorenz aplicada nos municípios estudados para concepção das suas heterogeneidades



Fonte: Organizado pelo autor.

Essa combinação de crescimento agregado e concentração espacial das emissões estabelece o pano de fundo para a etapa econométrica do estudo e reforça a necessidade de uma escolha metodológica precisa para o modelo de regressão a ser explorado na seção seguinte.

5.2 Resultados dos modelos econométricos

A Tabela 5 apresenta os resultados do modelo Pooled OLS, utilizado como linha de base inicial. Como discutido anteriormente, essa abordagem assume que todos os municípios compartilham uma estrutura homogênea, desconsiderando suas características individuais. Apesar disso, pode ser útil como ponto de partida para comparação com modelos mais robustos.

A Tabela 6 traz os resultados do modelo de RE, que considera variações específicas de cada município como parte do erro. Por fim, a Tabela 7 apresenta os

coeficientes estimados pelo modelo de FE, que se destaca por controlar características invariantes no tempo para cada município.

Tabela 5 - Resultados do modelo Pooled OLS

Nome da variável	Coeficiente	Erro Padrão	T-Stat	P> t
Const (emissão)	5,88	0,71	8,26	0,00
ln_pva_industrial	0,11	0,04	2,57	0,01
ln_qtd_veiculo	-0,02	0,08	-0,31	0,75
ln_populacao	0,20	0,11	-1,81	0,07
ln_dens_demografica	0,63	0,04	16,14	0,0
ln_pib_percapta	0,31	0,08	3,78	0,0

Fonte: Organizado pelo autor.

Tabela 6 - Resultados do modelo Efeitos Aleatórios (RE)

Nome da variável	Coeficiente	Erro Padrão	T-Stat	P> t
Const (emissão)	9,77	0,34	28,52	0,00
ln_pva_industrial	-0,01	0,01	-2,15	0,03
ln_qtd_veiculo	0,21	0,12	17,33	0,00
ln_populacao	-0,39	0,05	-7,88	0,00
ln_dens_demografica	0,57	0,04	13,17	0,00
ln_pib_percapta	0,13	0,01	11,79	0,00

Fonte: Organizado pelo autor.

Tabela 7 - Resultados do modelo Efeitos Fixos (FE)

Nome da variável	Coeficiente	Erro Padrão	T-Stat	P> t
Const (emissão)	9,27	3,43	2,70	0,00
ln_pva_industrial	-0,01	0,00	-2,61	0,01
ln_qtd_veiculo	0,22	0,01	17,58	0,00
ln_populacao	-0,23	0,61	-0,38	0,70
ln_dens_demografica	0,30	0,61	0,50	0,61
ln_pib_percapita	0,14	0,01	12,36	0,00

Fonte: Organizado pelo autor.

Os coeficientes estimados para as variáveis de estudo dos modelos de efeitos fixos, como vistos na Tabela 7, revelam efeitos contrastantes sobre as emissões de CO₂eq. O PVA industrial apresentou um coeficiente de -0,01 ($p < 0,01$), indicando que, mantidas as demais variáveis constantes, um aumento de 1% na atividade industrial está associado, em média, a uma redução de 0,015% nas emissões, um resultado estatisticamente significativo, mas de pequena magnitude. Em contrapartida, a frota de veículos mostrou-se positivamente associada às emissões, com coeficiente de 0,217 ($p < 0,01$), sugerindo que um crescimento de 1% na frota resulta, em média, em um acréscimo de 0,22% nas emissões municipais.

A variável de densidade demográfica, embora não tenha apresentado significância estatística no modelo ($p = 0,61$), fornece uma leitura complementar relevante. Municípios mais densos tendem a concentrar maiores níveis absolutos de emissão, em função da intensidade das atividades econômicas e da urbanização. No entanto, o resultado sugere que a densidade demográfica não apresentou variação relevante ao longo do período analisado dentro dos municípios, o que pode explicar a ausência de efeito estatisticamente significativo sobre as emissões.

Esses achados destacam a relevância das duas variáveis como vetores de impacto ambiental distintos. No caso da indústria, evidências como as de Polloni-Silva et al. (2021) sugerem que regiões com maior intensidade industrial podem reduzir suas emissões ao longo do tempo por meio da modernização de processos, políticas de controle ambiental e realocação setorial. O fenômeno é observado em municípios

como Cubatão e Santos, tradicionalmente industriais, em concordância com a hipótese do “desacoplamento” entre crescimento econômico e emissões, conforme explorado também por Dong et al. (2020) em contextos emergentes.

Em relação à frota de veículos, o sinal positivo e estatisticamente robusto reforça o papel crítico do setor de transportes nas emissões urbanas, aspecto amplamente discutido por Van Soest et al. (2017) e reafirmado pelo IPCC (2022) como um dos principais desafios para a transição energética em regiões urbanizadas.

O padrão difuso e massivo de crescimento da frota, especialmente em áreas periféricas e médias do interior paulista, confere ao transporte individual um peso estruturante nas emissões locais. Como destacado por Lv et al. (2020), Liddle (2015) e Liddle e Huntington (2020), a elasticidade entre frota e emissões tende a ser elevada em países em desenvolvimento, dado o predomínio de veículos a combustão e a limitação da mobilidade coletiva de baixo carbono.

A fim de validar a escolha da especificação econométrica mais adequada aos dados em painel, foram aplicados testes comparativos entre os modelos pooled OLS, RE e FE, cujos resultados são sintetizados na Tabela 8.

Inicialmente, utilizou-se o teste F de poolabilidade para avaliar se a inclusão de efeitos fixos por município proporciona ganho estatístico em relação ao modelo pooled. A estatística obtida ($F = 1.321,10$; $p < 0,01$) rejeita com folga a hipótese nula de ausência de efeitos individuais, indicando que a heterogeneidade entre os municípios é estatisticamente relevante e que o modelo pooled OLS é inadequado para representar a estrutura dos dados.

Na sequência, a escolha entre os modelos com efeitos fixos e aleatórios foi conduzida por meio do teste de Hausman. Esse teste avalia a existência de correlação entre os efeitos específicos dos municípios e as variáveis explicativas.

O resultado ($\chi^2 \approx 640$; $p < 0,01$) rejeita a hipótese nula de ausência de correlação, sugerindo que o modelo de efeitos aleatórios gera estimativas inconsistentes nesse contexto. Dessa forma, o modelo FE foi selecionado como a especificação principal do estudo, servindo de base para análises complementares apresentadas nas seções subsequentes.

Tabela 8 - Testes de seleção do modelo econométrico para dados em painel

Teste	Estatística do Teste	P-Valor	Decisão	Modelo Vencedor
F-test (Pooled OLS vs Efeitos Fixos)	1.321	0,00	Rejeita H_0 de ausência de efeitos individuais	Efeitos Fixos (FE)
Hausman (Efeitos Fixos vs Aleatórios)	640	0,00	Rejeita H_0 de consistência do modelo de efeitos aleatórios	Efeitos Fixos (FE)

Fonte: Organizado pelo autor.

Em função desse diagnóstico, as estimativas finais do modelo de efeitos fixos foram reportadas com erros-padrão robustos, corrigidos por cluster em nível municipal. Essa medida não altera os coeficientes estimados, mas ajusta suas estatísticas inferenciais (erros-padrão, valores de t e p-valores), proporcionando maior robustez e confiabilidade às conclusões obtidas a partir da análise.

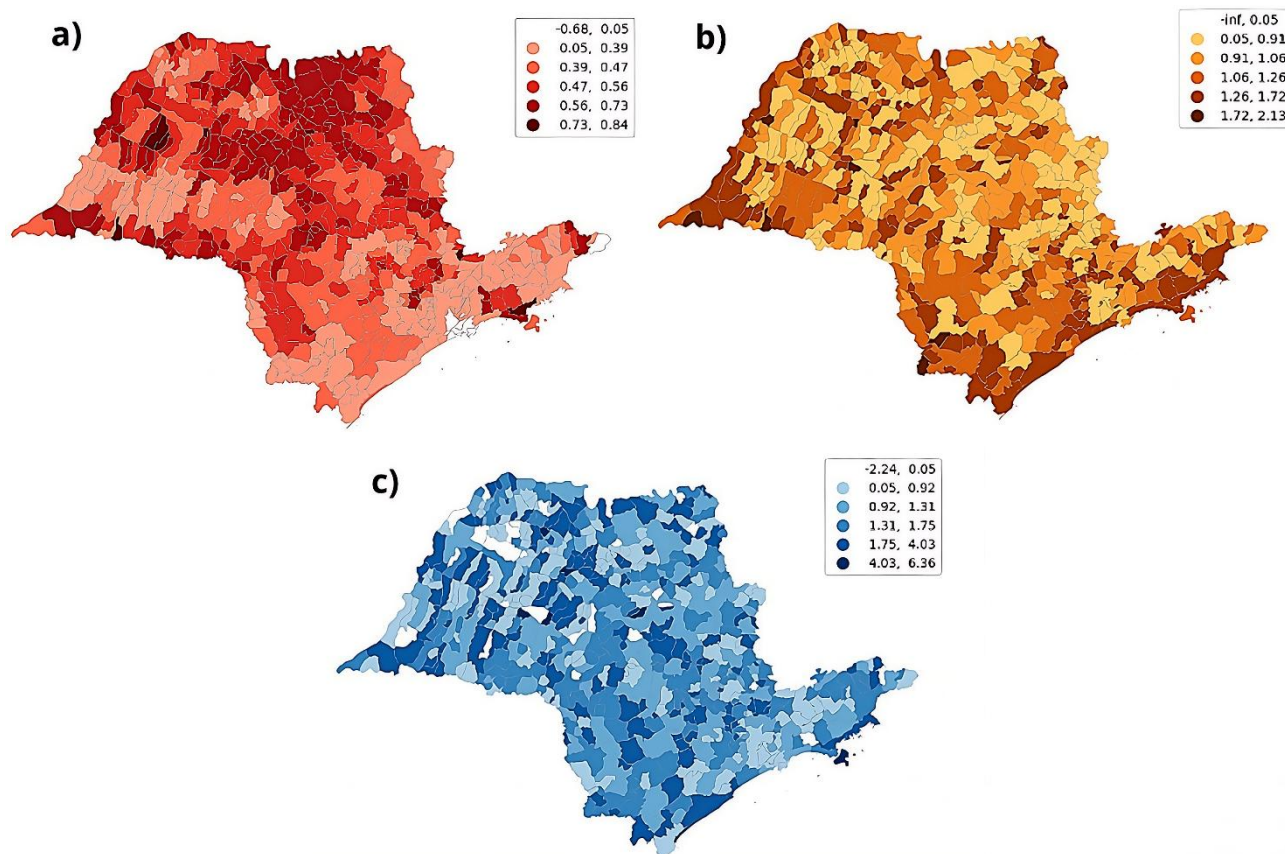
5.3 Análises de suporte e exemplos

A análise espacial reforça a necessidade de interpretar os coeficientes econométricos à luz das dinâmicas territoriais. A Figura 7 apresenta a variação percentual das emissões de CO₂ (Figura 7a), PVA Industrial (Figura 7b) e Frota de Veículos (Figura 7c) por município entre 2003 e 2020.

Em relação às emissões, observa-se uma concentração mais intensa de aumentos nas regiões oeste e noroeste, além de polos industriais consolidados no interior. Com crescimento menos intenso, ou redução em municípios do leste do estado.

No entanto, ao compararmos com os mapas de variação do PVA industrial e da frota de veículos, ainda na Figura 7, nota-se que essas variáveis não seguem um padrão territorial tão coeso quanto o observado nas emissões. O crescimento do PVA industrial, por exemplo, está mais concentrado no sudeste paulista, litoral e Vale do Ribeira, regiões onde as emissões muitas vezes se mantiveram estáveis ou até mesmo caíram, sugerindo ganhos de eficiência.

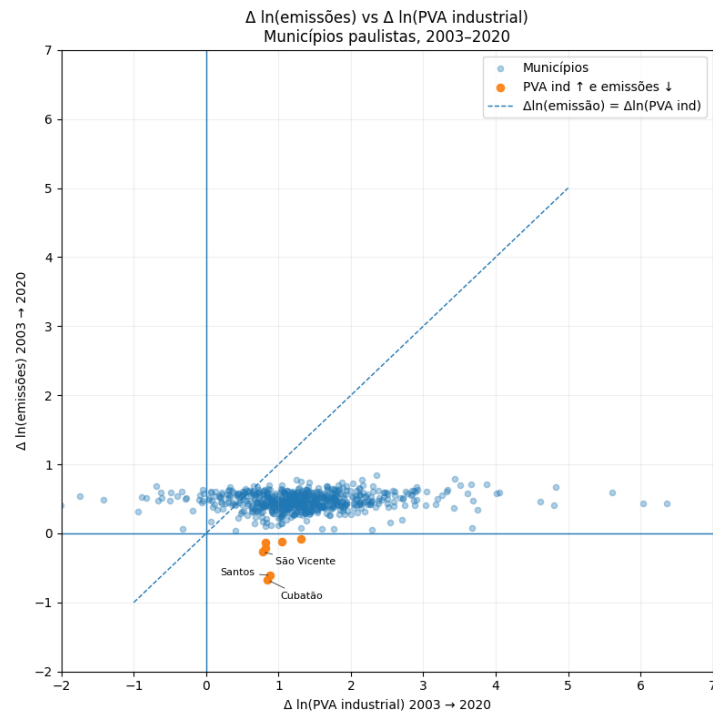
Figura 7 - Mapas comparativos da variação dos indicadores no período na base logarítmica: (a) emissões; (b) pva_industrial e (c) frota_veiculos



Fonte: Organizado pelo autor.

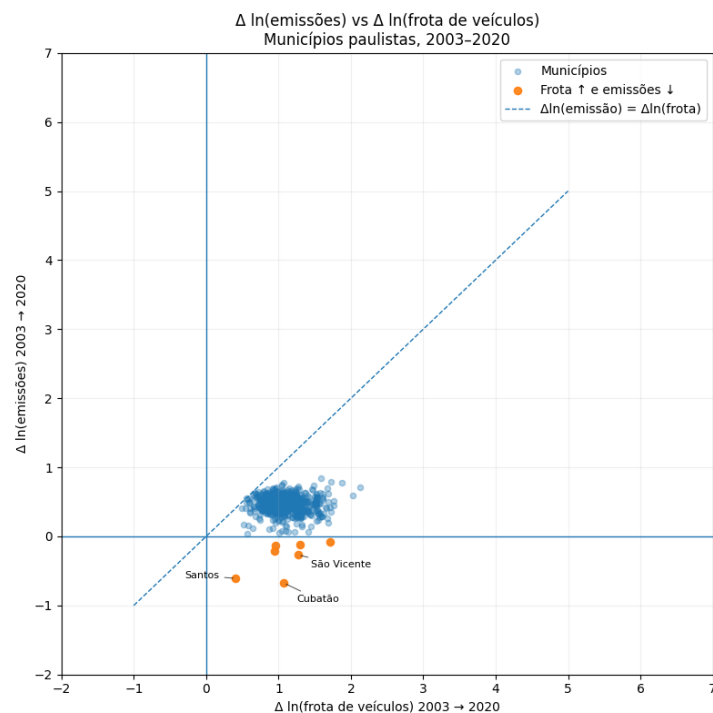
Para tornar essa comparação mais objetiva, foram elaborados dois gráficos de dispersão (Figuras 8 e 9), relacionando a variação logarítmica das emissões à variação do PVA industrial e da frota, respectivamente. Em ambos os casos, a linha diagonal representa o ponto em que emissões e atividade cresceram na mesma proporção. Pontos abaixo da diagonal indicam uma redução da intensidade de carbono, ou seja, emissões cresceram em ritmo mais lento que o PVA/frota.

Figura 8 - Gráfico de dispersão do delta de emissão pelo delta de pva industrial no período de 2003 a 2020.



Fonte: Organizado pelo autor.

Figura 9 - Gráfico de dispersão do delta de emissão pelo delta de frota de veículos no período de 2003 a 2020.



Fonte: Organizado pelo autor.

Os resultados indicam que, embora haja variações, a frota de veículos apresenta uma relação mais direta e coesa com o aumento das emissões, a maioria dos municípios segue um padrão próximo à linha de 45°, com menor dispersão. Já no caso do PVA industrial, os dados revelam maior heterogeneidade: diversos municípios ampliaram significativamente sua atividade industrial sem aumentos proporcionais nas emissões, representados pelos pontos à direita mais distante da linha de 45°.

Casos como Cubatão, Santos e São Vicente se destacam pela redução das emissões de CO₂eq entre 2003 e 2020, mesmo diante do crescimento expressivo da atividade industrial e da frota de veículos (ver Figura 6). Esse comportamento contraria a tendência predominante entre os municípios paulistas e exemplifica o fenômeno de “desacoplamento” entre desenvolvimento econômico e emissões, geralmente associado à modernização tecnológica, à efetividade de políticas ambientais e a transformações estruturais no perfil produtivo (Tayra et al., 2012).

Em Cubatão, esse fenômeno encontra-se amplamente documentado. Historicamente considerado um dos polos industriais mais poluentes do Brasil — sobretudo na década de 1980, o município passou por um processo de reestruturação ambiental a partir da implementação do Programa de Controle da Poluição Ambiental, institucionalizado pela CETESB em 1985. O programa estabeleceu metas rigorosas de controle de emissões, promoveu a adoção de tecnologias limpas e consolidou um sistema robusto de monitoramento da qualidade do ar (CETESB, 1985).

Como resultado, Cubatão transformou-se de um dos locais mais poluídos do planeta, com índices críticos de SO₂, material particulado e metais pesados, em referência nacional em gestão ambiental urbana. Entre 1984 e 1990, o município alcançou reduções superiores a 90% nas emissões de dióxido de enxofre, óxidos de nitrogênio e partículas inaláveis em suas áreas industriais (Tayra et al., 2012).

Esse desempenho foi possível graças à atuação articulada entre a CETESB, o setor produtivo e o poder público, que implementaram mais de 300 projetos corretivos de controle ambiental (CETESB, 1985). Tal esforço consolidou um sistema de monitoramento contínuo da qualidade do ar e licenciamento ambiental rigoroso, cujos efeitos positivos vêm sendo observados até os dias atuais.

Apesar do bom desempenho observado na variação das emissões, com alguns municípios da Baixada Santista apresentando inclusive reduções absolutas, a região ainda responde por um volume significativo de emissões totais (ver Figura 5). Por isso,

políticas públicas continuam sendo implementadas com o objetivo de mitigar seus impactos climáticos.

Um exemplo recente é o Plano de Ação Climática de Santos (PACS), lançado em 2022, que estabelece diretrizes de mitigação e adaptação às mudanças climáticas. O plano prevê metas relacionadas à eficiência energética urbana, ao controle de emissões atmosféricas e à infraestrutura resiliente (Santos, 2022). Embora seus impactos quantitativos ainda não sejam plenamente mensurados, o PACS sinaliza o compromisso contínuo de grandes centros emissores com a redução de sua pegada ambiental.

Esses casos demonstram que, embora se comportem como outliers em relação ao padrão observado no estado, políticas públicas bem direcionadas podem ter efeitos positivos na mitigação das emissões de gases de efeito estufa. A experiência de municípios como Cubatão evidencia que é possível conciliar crescimento econômico e industrial com estratégias de controle ambiental efetivas.

Tais achados reforçam os resultados obtidos pelo modelo de FE, ao mostrar que variações intra-municipais ao longo do tempo podem estar associadas a transformações estruturais impulsionadas por políticas locais. Dessa forma, a análise empírica não apenas quantifica relações, mas também revela caminhos possíveis para um desenvolvimento urbano mais sustentável.

6 CONCLUSÃO

Os resultados indicam que as emissões de CO₂eq nos municípios paulistas estão fortemente associadas à mobilidade urbana, representada pela frota de veículos, enquanto variáveis como atividade industrial apresentaram efeitos menos intensos do que o esperado. Observou-se também elevada heterogeneidade entre os municípios, com forte concentração das emissões em poucos polos e evidências de padrões distintos de desenvolvimento e impacto ambiental. Esses achados reforçam a necessidade de políticas públicas territorializadas, capazes de considerar as especificidades locais.

Como desdobramentos futuros, destacam-se a inclusão de novas variáveis de controle, como matriz energética e uso do solo, a expansão da análise para outras regiões e períodos, o avanço para abordagens causais mais robustas e a aplicação de técnicas de clusterização de municípios, com o objetivo de identificar perfis semelhantes a fim de apoiar a formulação de políticas públicas mais direcionadas e eficazes.

REFERÊNCIAS

- CETESB. **Programa de Controle da Poluição Ambiental em Cubatão**. São Paulo: CETESB, 1985. Disponível em: <https://repositorio.cetesb.sp.gov.br/handle/123456789/3090>. Acesso em: 29 set. 2025.
- COWELL, Frank A. **Measuring inequality**. 3. ed. Oxford: Oxford University Press, 2011.
- CRANSTON, Gemma; HAMMOND, G. P. **Egalité, fraternité, sustainabilité: evaluating the significance of regional affluence and population growth on carbon emissions**. International Journal of Global Warming, v. 2, p. 189–210, 2010.
- CUSTÓDIO, J. N. **Determinantes do impacto ambiental com base no STIRPAT: aplicação do modelo PMG-ARDL para dados em painel**. 2024. 96 f. Dissertação (Mestrado em Economia) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2024.
- DIETZ, T.; ROSA, E. A. Rethinking the environmental impacts of population, affluence and technology. **Human Ecology Review**, v. 1, n. 2, p. 277–300, 1994.
- DONG, Kangyin; HOCHMAN, Gal; TIMILSINA, Govinda. **Do drivers of CO2 emission growth alter overtime and by the stage of economic development? Energy Policy**, v. 140, p. 111420, 2020.
- EHRlich, P. R.; HOLDREN, J. P. Impact of population growth. **Science**, v. 171, n. 3977, p. 1212–1217, 1971.
- GURGEL, A.; PALTSEV, S.; BREVIGLIERI, G. V. The impacts of the Brazilian NDC and their contribution to the Paris agreement on climate change. **Environment and Development Economics**, v. 24, p. 395–412, 2019.
- IPCC. Climate Change 2022: **The Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (AR6)**. Genebra: Intergovernmental Panel on Climate Change, 2022. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/assessment-report/ar6>. Acesso em: 29 set. 2025.
- JEDYN, A.; VIEIRA, C.; ANDRADE, L. A economia verde no Brasil e os fatores determinantes para a transição: uma análise pelo modelo STIRPAT. **Territorios**, n. 53, p. 1-25, 2025.
- LIDDLE, B. What are the carbon emissions elasticities for income and population? Bridging STIRPAT and EKC via robust heterogeneous panel estimates. **Global Environmental Change**, v. 31, p. 62-73, 2015.
- LIDDLE, B.; HUNTINGTON, H. G. Revisiting the income elasticity of energy consumption: A heterogeneous, common factor, dynamic oecd & non-oecd country panel analysis. **The Energy Journal**, v. 41, n. 3, p. 207-230, 2020.

LV, Z.; LI, S. How financial development affects CO₂ emissions: A spatial econometric analysis. **Journal of Environmental Management**, v. 277, p. 111397, 2021.

OBSERVATÓRIO DO CLIMA. **Sistema de Estimativas de Emissões de Gases de Efeito Estufa (SEEG)**. São Paulo: SEEG, 2023. Disponível em: <https://seeg.eco.br>. Acesso em: 29 set. 2025.

OMRI, A. Asymmetric effects of renewable energy consumption and trade openness on environmental quality in MENA countries. **Environmental Research**, v. 168, p. 614–624, 2019.

OPPERMANN, Priscila de Almeida. **As políticas públicas de mudanças climáticas no Estado de São Paulo: um estudo da formulação à implementação da PEMC**. 2017. Tese (Doutorado em Ciência Ambiental) – Programa de Pós-Graduação em Ciência Ambiental, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2017.

OUR WORLD IN DATA. **CO₂ and Greenhouse Gas Emissions**. 2023. Disponível em: <https://ourworldindata.org/co2-and-other-greenhouse-gas-emissions>. Acesso em: 27 jul. 2025.

PALLA, X. **The Impact of Financial Development, Economic Growth, Trade and Population Growth on CO₂ Emissions in Eastern European Countries**. 2025. Dissertação (Mestrado em Economia) – Faculty of Economics, Tirana University, Tirana, 2025.

POLLONI-SILVA, E.; FERRAZ, D.; CAMIOTO, F. C.; REBELLATO, D. A. N. Morales, H. F. Environmental Kuznets Curve and the Pollution-Halo/Haven Hypotheses: An Investigation in Brazilian Municipalities. **Sustainability**, v. 13, p. 4114, 2021.

SANTOS (Município). **Plano de Ação Climática de Santos – PACS**. Santos: Prefeitura Municipal de Santos, 2022. Disponível em: https://www.santos.sp.gov.br/static/files/www/files/portal_files/hotsites/pacs/plano_d_e_acao_climatica_de_santos_pacs_sumario_executivo.pdf. Acesso em: 27 jul. 2025.

SÃO PAULO (Estado). **Decreto nº 55.947, de 24 de junho de 2010**. Regulamenta a Lei nº 13.798, de 09 de novembro de 2009, que institui a Política Estadual de Mudanças Climáticas – PEMC. Diário Oficial do Estado de São Paulo, São Paulo, 25 jun. 2010.

SÃO PAULO (Estado). **Plano Estadual de Energia 2050 – PEE 2050**. São Paulo: Secretaria de Infraestrutura e Meio Ambiente, 2022. Disponível em: <https://energia.sp.gov.br/pee>. Acesso em: 28 set. 2025.

SÃO PAULO (Estado). **Política Estadual de Mudanças Climáticas – 10 anos: histórico, evolução e perspectivas**. São Paulo: SIMA/AMC, 2022. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/mudancas-climaticas/>. Acesso em: 28 set. 2025.

SÃO PAULO (Estado). **Projeto de Lei nº 1510, de 2023. Dispõe sobre a isenção do IPVA para veículos elétricos e híbridos no Estado de São Paulo**. Assembleia

Legislativa do Estado de São Paulo, São Paulo, 2023. Disponível em: <https://www.al.sp.gov.br>. Acesso em: 28 set. 2025.

SILVA, F. F.; RODRIGUES, L. dos A.; MOREIRA, R. B.; COELHO, A. B. Determinantes da emissão de CO₂ por uso de combustíveis fósseis para países sul-americanos: uma abordagem STIRPAT. **Revista de Economia**, v. 41, n. 1, p. 77–94, 2015.

SHAHBAZ, M.; NASIR, M. A.; ROUBAUD, D. **Environmental degradation in France: the effects of FDI, financial development, and energy innovations**. *Energy Economics*, v. 74, p. 843–857, 2018.

TAYRA, F.; RIBEIRO, H.; NARDOCCI, A. C. Avaliação econômica dos custos da poluição em Cubatão-SP com base nos gastos com saúde relacionados às doenças dos aparelhos respiratório e circulatório. **Saúde e Sociedade**, v. 21, n. 3, p. 760-775, 2012.

VAN SOEST, H. V. et al. **Low-emission pathways in 11 major economies: comparison of cost-optimal pathways and Paris climate proposals**. *Climatic Change*, v. 142, p. 491–504, 2017.

VILEMA-ESCUADERO, S. F.; MANYA-ORELLANA, M. Have green taxes worked since Paris: Evidence from Latin American countries. **IOP Conference Series: Earth and Environmental Science**, v. 1544, n. 1, p. 012005, 2025.

WOOLDRIDGE, Jeffrey M. **Introductory econometrics: a modern approach**. 4. ed. Mason: South-Western Cengage Learning, 2010.