

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA  
CAMPUS GOVERNADOR VALADARES  
INSTITUTO DE CIÊNCIAS SOCIAIS APLICADAS  
DEPARTAMENTO DE ECONOMIA**

**LIURY SENA PEREIRA**

**DETERMINANTES REGIONAIS DAS EMISSÕES EQUIVALENTES DE DIÓXIDO  
DE CARBONO EM MINAS GERAIS: UMA ANÁLISE A PARTIR DO MODELO  
STIRPAT**

Governador Valadares - MG

2024

**LIURY SENA PEREIRA**

**DETERMINANTES REGIONAIS DAS EMISSÕES EQUIVALENTES DE DIÓXIDO  
DE CARBONO EM MINAS GERAIS: UMA ANÁLISE A PARTIR DO MODELO  
STIRPAT**

Monografia apresentada ao curso de Ciências Econômicas da Universidade Federal de Juiz de Fora, Campus Governador Valadares, como requisito para obtenção do título de Bacharel em Ciências Econômicas.

Orientador: Thiago Costa Soares

Governador Valadares - MG

2024



UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA  
Departamento de Economia do Campus GV

**ECO013GV MONOGRAFIA II**  
**ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO**

Às 14 horas do dia 30 de Setembro de 2024, ( ) na sala \_\_\_\_\_ ( x ) por webconferência, foi instalada a banca do exame de Trabalho de Conclusão de Curso para julgamento do trabalho desenvolvido pelo(a) discente Liury Sena Pereira, matriculado(a) no curso de bacharelado em Ciências Econômicas. O(a) Prof. (a) Thiago Costa Soares, orientador(a) e presidente da banca julgadora, abriu a sessão apresentando os demais examinadores, os professores: Sergio Louro Borges.

Após a arguição e avaliação do material apresentado, relativo ao trabalho intitulado: DETERMINANTES REGIONAIS DAS EMISSÕES EQUIVALENTES DE DIÓXIDO DE CARBONO EM MINAS GERAIS: UMA ANÁLISE A PARTIR DO MODELO STIRPAT, a banca examinadora se reuniu em sessão fechada considerando o(a) discente:

- ( ) Aprovado (a)  
( x ) Aprovado (a) com correções  
( ) Reprovado (a)

Nada mais havendo a tratar, foi encerrada a sessão e lavrada a presente ata que vai assinada pelos presentes.

Governador Valadares, 01 de Outubro de 2024.

\_\_\_\_\_  
Orientador(a)

\_\_\_\_\_  
Membro da Banca I

\_\_\_\_\_  
Membro da Banca II (opcional)

\_\_\_\_\_  
Aluno (a)



Documento assinado eletronicamente por **Thiago Costa Soares, Professor(a)**, em 01/10/2024, às 07:52, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Liury Sena Pereira, Usuário Externo**, em 01/10/2024, às 08:18, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).

04/10/24, 08:08

SEI/UFJF - 2012636 - ADM:Geral 002 - Ata de Reunião



Documento assinado eletronicamente por **Sergio Louro Borges, Professor(a)**, em 01/10/2024, às 14:33, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no Portal do SEI-Ufjf ([www2.ufjf.br/SEI](http://www2.ufjf.br/SEI)) através do ícone Conferência de Documentos, informando o código verificador **2012636** e o código CRC **D1B072EA**.

Referência: Processo nº 23071.934697/2024-61

SEI nº 2012636

Ficha catalográfica elaborada através do programa de geração automática da Biblioteca Universitária da UFJF, com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

Pereira, Liúry Sena.

Determinantes regionais das emissões equivalentes de dióxido de carbono em Minas Gerais: uma análise a partir do modelo STIRPAT / Liúry Sena Pereira. -- 2024.

21 p.

Orientador: Thiago Costa Soares

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) - Universidade Federal de Juiz de Fora, Campus Avançado de Governador Valadares, Faculdade de Economia, 2024.

1. Emissões de GEE. 2. STIRPAT. 3. Dados em Painel. 4. Minas Gerais. I. Soares, Thiago Costa, orient. II. Título.

## RESUMO

O presente trabalho tem como objetivo analisar os impactos de um conjunto de características socioeconômicas locais sobre as emissões de gases de efeito estufa (GEE) nos municípios de Minas Gerais, entre 2015 e 2019, utilizando o modelo estocástico STIRPAT. Para a metodologia foi adotado o método de dados em painel com efeitos fixos. Os resultados indicaram que as variáveis com a maior influência nas emissões de GEE no Estado mineiro foram o PIB, a urbanização e a população, respectivamente. As parcelas de participação dos setores agropecuário, industrial e serviços não foram significativas no modelo. O trabalho conclui que compreender os aspectos regionais de emissões de GEE é importante para futuras tomadas de decisões governamentais acerca do tema, levando em conta as particularidades de cada região.

**Palavras-chave:** Emissões de GEE; STIRPAT; Dados em Painel e Minas Gerais.

## **ABSTRACT**

The present study aims to analyze the impacts of a set of local socioeconomic characteristics on greenhouse gas (GHG) emissions in the municipalities of Minas Gerais between 2015 and 2019, using the stochastic STIRPAT model. The methodology adopted was the panel data method with fixed effects. The results indicated that the variables with the greatest influence on GHG emissions in the state of Minas Gerais were GDP, urbanization, and population, respectively. The shares of participation of the agricultural, industrial, and services sectors were not significant in the model. The study concludes that understanding the regional aspects of GHG emissions is important for future government decision-making on the topic, taking into account the particularities of each region.

**Keywords:** GHG Emissions; STIRPAT; Panel Data; Minas Gerais.

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Descrição das variáveis .....	13
Tabela 2 - Resultados das estimações .....	14



## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>7</b>
<b>2 METODOLOGIA.....</b>	<b>9</b>
<b>2.1 Modelo empírico .....</b>	<b>9</b>
<b>2.2 Métodos de estimação.....</b>	<b>10</b>
<b>2.3 Descrição e fontes dos dados.....</b>	<b>11</b>
<b>3 RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>14</b>
<b>4 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>18</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>19</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O aquecimento global é um fenômeno que afeta todo o planeta. Existem evidências de que o planeta está ficando mais quente a cada ano e que as emissões antrópicas de gases de efeito estufa (GEE) são uma das causas (SILVA; PAULA, 2015). Dentre os principais impactos do aquecimento global, podem-se citar uma série de consequências negativas, como perdas irreversíveis na biodiversidade de plantas e animais, prejuízos na agricultura e diminuição da segurança alimentar global (YORK; ROSA; DIETZ, 1994). Além disso, o aumento da temperatura global promove deslocamentos forçados de populações em áreas mais vulneráveis, resultando em refugiados climáticos e pressões sociais e econômicas (OLIVEIRA; DE AZEVEDO IRVING; COUTINHO, 2013).

Nos últimos anos, diversos tratados ambientais foram assinados a fim de abordar questões relacionadas à proteção do meio ambiente, à redução das emissões e à sustentabilidade, com destaque para o Acordo de Paris, adotado em 2015, durante a 21ª Conferência das Partes (COP 21) da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima (UNFCCC). O objetivo principal do Acordo de Paris é mitigar as mudanças climáticas, limitando o aumento da temperatura global a menos de 2 graus Celsius (°C) acima dos níveis pré-industriais e buscando esforços para limitar o aumento a 1,5 °C. Para alcançar esse objetivo, os países signatários se comprometeram a tomar medidas para reduzir as emissões de GEE e fortalecer a resiliência dos ecossistemas aos impactos das mudanças climáticas (COP 21, 2015).

O entendimento sobre a relação entre as emissões de poluentes e seus principais motores antrópicos é crucial para o desenvolvimento de políticas alinhadas aos objetivos do Acordo de Paris. Nesse sentido, diversos estudos buscaram identificar o impacto de tais fatores no nível emitido por diferentes países, a exemplo das pesquisas de Lin, Zhao e Marinova (2009), Shahbaz *et al.* (2016) e Anser (2019), entre outros. Esses estudos apontam que as emissões de GEE são impactadas, principalmente, pelo tamanho populacional, crescimento da produção de bens e serviços, grau de urbanização e consumo energético.

No Brasil, o 6º maior emissor de GEE a nível global (World Bank, 2023), um número significativo de pesquisas buscou quantificar as emissões de setores e atividades econômicas, como Berchielli *et al.* (2012), Leite *et al.* (2020), Valeretto e Constantino (2022), entre outros. Não obstante, são escassos os estudos que analisam os determinantes regionais das emissões de GEE no país. Conforme destacam Soares e da Cunha (2019), o entendimento sobre a influência

das particularidades locais sobre as emissões de GEE é relevante para o desenvolvimento de modelos produtivos mais sustentáveis, tanto regional quanto nacionalmente.

Diante do exposto, o objetivo deste estudo é analisar os impactos de um conjunto de características socioeconômicas locais sobre as emissões de GEE nos municípios de Minas Gerais, entre 2015 e 2019. Minas Gerais é o 2º estado mais populoso do Brasil e possui o maior número de municípios do país (853 localidades). Além disso, figura entre aqueles com maior potencial econômico (3º maior PIB) e é o 3º no ranking dos emissores estaduais de GEE, atrás somente do Pará e Mato Grosso (SEEG, 2022).

Metodologicamente, buscou-se estimar o impacto de variáveis socioeconômicas (tamanho populacional, PIB e participação dos setores na economia) sobre as emissões de GEE a partir de métodos de dados em painel aplicados em um modelo do tipo *Stochastic Impacts by Regression on Population, Affluence and Technology* (STIRPAT) (DIETZ; ROSA, 1998; YORK; ROSA; DIETZ, 2003).

Este estudo se divide em outras quatro seções, além desta introdução. Na segunda seção, apresenta-se a metodologia utilizada e a formulação empírica do estudo. Na terceira seção apresenta-se a descrição e a fonte dos dados. Nas últimas duas seções, reportam-se os resultados, discussões e as considerações finais.

## 2 METODOLOGIA

### 2.1 Modelo empírico

O modelo utilizado neste estudo é o STIRPAT, derivado do modelo IPAT. A identidade IPAT é uma equação usada no ramo da economia ambiental para explicar os fatores que contribuem para o impacto ambiental (EHRILICH; HOLDREN, 1971). Ela é nomeada de acordo com a fórmula que a representa:  $I = P \times A \times T$ , em que  $I$  denota o impacto ambiental, que pode ser medido pelas emissões de poluentes;  $P$  expressa o tamanho populacional, o qual tem impacto direto na degradação do meio ambiente;  $A$  mede o efeito positivo do nível de afluência (atividade econômica) sobre  $I$ ; e  $T$  representa uma medida inversa de tecnologia, considerando que o avanço tecnológico promove economia de recursos e redução dos impactos ambientais (VÉLEZ-HENAO; VIVANCO; HERNÁNDEZ-RIVEROS, 2019).

Uma opção alternativa ao modelo IPAT é o STIRPAT, uma variação que oferece maior flexibilidade nos parâmetros de sensibilidade e permite a estimação das relações entre as variáveis mencionadas anteriormente por meio de uma função estocástica, que incorpora incertezas e os efeitos de variáveis aleatórias, conforme ilustra a Expressão (1):

$$I_{it} = \alpha P_{it}^{\beta} A_{it}^{\gamma} T_{it}^{\delta} \varepsilon_{it}, \quad (1)$$

em que  $\alpha$  é uma constante;  $\beta$ ,  $\gamma$  e  $\delta$  são parâmetros a serem estimados; e  $\varepsilon$  é o termo de erro estocástico, com média zero e variância constante. Em (1),  $I$  representa as emissões de GEE;  $P$  é uma variável que representa a população da localidade;  $A$  ilustra o nível de renda; e  $T$  descreve o padrão tecnológico municipal.

A forma empírica de (1), em logaritmo natural, pode ser descrita pela Expressão (2):

$$\begin{aligned} \ln GEE_{it} = & \alpha + \beta_1 \ln POP_{it} + \beta_2 \ln PIB_{it} + \beta_3 \ln PIB_{pcit}^2 + \beta_4 \ln PIB_{pcit}^3 + \beta_5 \ln aAGRO_{it} \\ & + \beta_6 \ln IND_{it} + \beta_7 \ln URB_{it} + \beta_8 \ln SERV_{it} + \varepsilon_{it}. \end{aligned} \quad (2)$$

As emissões de GEE referem-se ao total de emissões dos principais GEE, convertidos em CO<sub>2</sub> equivalente (SEEG, 2021). Consideram-se as emissões veiculares, residenciais, comerciais e industriais (PATARASUK *et al.*, 2016).

Em relação ao PIB, avaliou-se sua forma quadrática e cúbica, de modo a considerar uma possível relação não linear entre o nível de renda e o impacto ambiental (ZHENG *et al.* 2016). Carvalho e Almeida (2010), Castro *et al.* (2019) e Barros e Stege (2019) identificaram uma relação não linear através da Curva de Kuznets. A Curva Ambiental de Kuznets (CAK) é uma hipótese que estabelece uma relação entre o desenvolvimento econômico de um país e o impacto ambiental causado por esse desenvolvimento. Essa teoria, derivada da Curva de Kuznets original, sugere que, em estágios iniciais de crescimento econômico, a degradação ambiental tende a aumentar à medida que o país se industrializa e explorar mais intensamente seus recursos naturais. No entanto, em certo ponto de inflexão, à medida que a economia continua a crescer e se diversificar, a consciência ambiental e a capacidade tecnológica aumentam, resultando em uma redução progressiva dos impactos ambientais.

Por fim, buscou-se capturar a influência da tecnologia municipal nas emissões por meio da inclusão da participação dos setores na economia. Segundo Grossman e Krueger (1991), a estrutura econômica se relaciona com o grau e a intensidade tecnológica das localidades. Por exemplo, a dominância do setor agropecuário em uma localidade reflete atividades econômicas mais tradicionais e de menor impacto ambiental. Já em cidades cuja participação do setor industrial é predominante, observa-se o uso de tecnologias mais avançadas na produção, o que permite um significativo aumento da produtividade e das emissões associadas ao processo produtivo. A participação massiva do setor de serviços, por sua vez, está associada a etapas mais avançadas do processo de desenvolvimento, com o crescimento de setores de informação, comunicação e a redução relativa dos insumos no processo de produção, incluindo os naturais. Assim, associa-se uma maior participação desse setor a localidades mais desenvolvidas tecnologicamente.

## **2.2 Métodos de estimação**

A Equação (2) pode ser estimada por métodos tradicionais de dados em painel. De acordo com Marques (2000), a principal vantagem da utilização de modelos de dados em painel refere-se ao controle da heterogeneidade individual não observável, isto é, de características individuais constantes no tempo, que afetam as emissões de GEE a nível regional, mas que não podem ser observadas diretamente por meio de dados, como a cultura local, as instituições existentes ou fatores tecnológicos não capturados explicitamente no modelo. Além disso, a estrutura em painel fornece uma maior quantidade de informação, maior variabilidade dos

dados, menor colinearidade entre as variáveis, maior número de graus de liberdade e maior eficiência na estimação (MARQUES, 2000).

Para a análise de dados em painel, podem-se utilizar três modelos básicos: o modelo *pooled*, o modelo de efeitos fixos e o de efeitos aleatórios, que são abordagens diferentes para considerar a heterogeneidade não observável entre as unidades de análise em um conjunto de dados. No modelo *pooled*, as unidades são agrupadas em um único conjunto de dados e assume-se que toda a heterogeneidade das regiões é incluída no modelo, de modo que a influência dos elementos não observáveis supracitados não é considerada. No modelo de efeitos fixos, as características não observáveis invariantes no tempo são incluídas por meio de *dummies* de corte transversal. Já na especificação com efeitos aleatórios, os elementos não observáveis são estimados por meio do resíduo da regressão e pressupõe-se que essas características não possuem correlação com os regressores do modelo.

Na busca pelo modelo mais adequado entre os três propostos (*pooled*, efeitos fixos e efeitos aleatórios), adotaram-se os testes estatísticos de Chow, Hausman e Breusch-Pagan. O teste de Chow verifica se as *dummies* que representam as características não observáveis são significativas, de modo que a rejeição da hipótese nula se torna uma evidência favorável ao modelo de efeitos fixos, em alternativa ao modelo *pooled*. Pelo teste de Hausman, analisa-se se os efeitos individuais são correlacionados com os regressores do modelo. A verificação dessa hipótese indica que o modelo de efeitos aleatórios é inconsistente e que o modelo de efeitos fixos é preferível. Por sua vez, o teste de Breusch-Pagan é adotado para examinar se as características individuais, incorporadas nos resíduos do modelo, possuem variância igual a zero. Neste caso, a rejeição dessa hipótese indica que o modelo de efeitos aleatórios é mais adequado que o modelo *pooled*. Adicionalmente, foram realizados os testes de Wooldridge para autocorrelação e White para heterocedasticidade. Para o caso de o modelo ser autocorrelacionado e/ou heterocedástico, a literatura recomenda a realização de uma estimação robusta da matriz de variâncias e covariâncias dos parâmetros (GUJARATI, 2011).

### **2.3 Descrição e fontes dos dados**

As variáveis foram escolhidas com base na literatura acerca do tema, tais como Zheng *et al.* (2016), Li *et al.* (2015), Zhang *et al.* (2014), Wang *et al.* (2021), Liu *et al.* (2019), Xiong, Chen e Xu (2020), Wang, Wu, Zhu e Wei (2013), Polloni *et al.* (2021), Zhang, Zhang e Pan (2019).

Foram coletadas variáveis de fontes secundárias, disponíveis no Índice Mineiro de Responsabilidade Social (IMRS), da Fundação João Pinheiro (FJP, 2023), e do Sistema de Estimativas de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa (SEEG, 2019), abrangendo o período de 2015 a 2019.

A variável dependente é o dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) equivalente (SEEG, 2021). Esse indicador considera, além do CO<sub>2</sub>, as emissões de metano (CH<sub>4</sub>) e óxido nitroso (N<sub>2</sub>O). Para o caso do CO<sub>2</sub>, as principais fontes de emissões antrópicas são o uso de combustíveis fósseis e o desmatamento. No caso do CH<sub>4</sub>, destacam-se os setores de produção e transporte de carvão, petróleo e gás natural, bem como a decomposição de resíduos orgânicos em aterros sanitários e a digestão e excreção de animais ruminantes. Já em relação ao N<sub>2</sub>O, os maiores responsáveis antrópicos por sua emissão são as atividades agrícolas e industriais. Considerou-se, na construção dessa variável, o fator de conversão do Potencial de Aquecimento Global (PAG) (em inglês, *Global Warming Potential*, GWP) (IPCC, 2014). Em resumo, cada um desses gases tem diferentes potenciais de aquecimento global, o que significa que eles contribuem para o aquecimento do planeta em diferentes graus. O PAG é uma medida da quantidade total de calor que um gás irá reter na atmosfera ao longo de um determinado período de tempo em relação ao CO<sub>2</sub>. Portanto, as emissões desses gases são frequentemente expressas como “equivalentes de CO<sub>2</sub>” para permitir comparações entre gases.

A variável população é referente à população total de cada município. A taxa de urbanização diz respeito ao número de pessoas residentes nas áreas urbanas municipais em relação ao total da população. Importante ressaltar que, devido às diferenças no estilo de vida urbano e rural, pessoas no meio urbano consomem mais energia do que em zonas rurais, logo, as emissões de GEE são mais relevantes em meios urbanos (ZHANG et al., 2014).

O PIB representa o valor adicionado, onde cada setor da economia (agropecuário, industrial e de serviços) contribui para o valor final de tudo que foi produzido durante o ano. Em relação aos setores produtivos, considerou-se o percentual de participação da agropecuária, indústria e serviços em relação ao total. A Tabela 1 descreve as variáveis adotadas no estudo.

Tabela 1. Descrição das variáveis

Variáveis	Unidade	Descrição	Fonte
GEE	Toneladas	Emissões per capita de GEE	SEEG
População	Número de pessoas	População total do município	IMRS
Urbanização	%	Percentual de pessoas residentes em áreas urbanas	IMRS
PIB	Mil R\$	Valor adicionado de todos os setores	IMRS
Agropecuária	%	Percentual de participação do setor agropecuário no valor adicionado	IMRS
Indústria	%	Percentual de participação do setor industrial no valor adicionado	IMRS
Serviços	%	Percentual de participação do setor de serviços no valor adicionado	IMRS

Fonte: Elaboração própria.

Nota: Os dados foram logaritmizados.



### 3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A Tabela 2 apresenta os resultados da estimação econométrica da Expressão (2).

Tabela 2 - Resultados das estimações

Variáveis	[1]	[2]	[3]	[4]	[5]	[6]	[7]	[8]
População	4.439***	4.434***	4.397***	4.407***	3.732***	3.169**	2.406*	2.420*
PIB		-0.043NS	-0.054NS	-0.070 NS	-6.615***	-79.446***	-69.215***	-69.794***
PIB <sup>2</sup>					0.319***	7.385***	6.419***	6.473***
PIB <sup>3</sup>						-0.227***	-0.196NS	-0.198NS
Agropecuária			0.041NS	0.041NS	0.137NS	0.139NS	0.135NS	0.142NS
Indústria				0.033NS	0.098 NS	0.104NS	0.096NS	0.098NS
Urbanização							-1.548**	-1.552**
Serviços								0.050NS
Máximo (R\$)						128.428,59		
Mínimo (R\$)					31.749,53	20.131,26		
R <sup>2</sup> within	0,957	0,957	0,958	0,958	0,958	0,958	0,958	0,958
R <sup>2</sup> between	0,038	0,038	0,038	0,038	0,039	0,04	0,04	0,041
R <sup>2</sup> overall	0,527	0,528	0,543	0,541	0,626	0,693	0,798	0,795

Nota: \*\*\*, \*\* e \* indicam níveis de significância de 1%, 5% e 10% respectivamente

Fonte: Elaboração a partir dos dados obtidos.

Para a análise das variáveis foi escolhido o modelo de efeitos fixos por ser o mais adequado, após a realização do teste de Chow e de Hausman. O modelo de efeitos fixos é utilizado quando se presume que as diferenças entre as unidades são sistemáticas e significativas. Esse modelo permite que cada unidade tenha seu próprio intercepto, capturando as características individuais não observáveis que podem influenciar a variável dependente.

A heterogeneidade das unidades diz respeito a fatores culturais de cada local, da matriz energética municipal e as particularidades de cada território. Essas características não variam de maneira uniforme entre os anos analisados. A heterogeneidade do tempo diz respeito a crises econômicas, fatores climáticos, conjuntura política, entre outros. Essas características não variam entre as unidades, mas são variantes no tempo.

Com base nos resultados exibidos na Tabela 2, observa-se que a variável população apresentou coeficientes significativos em todas as estimações, indicando uma relação positiva

entre o crescimento populacional e as emissões de GEE. O coeficiente estimado sugere que, para cada aumento de 1% na população, as emissões de GEE aumentam em 2,420%, reforçando o papel da população como um fator determinante nas emissões. Esses achados são consistentes com os resultados de Zhang, Zhang e Pan (2019) e Zheng et al. (2016), que identificaram uma correlação direta entre crescimento populacional e aumento das emissões de GEE em regiões urbanas da China.

A variável PIB apresenta coeficiente significativo ao nível de 1% de significância na estimação final. O coeficiente do PIB mostra uma relação negativa com as emissões de GEE, ou seja, quanto maior for o PIB, menor serão as emissões. Contudo, essa interpretação direta pode ser limitada, uma vez que diferentes níveis de renda podem afetar a relação de maneiras diferentes. Esse comportamento não linear é capturado pela inclusão dos termos quadrático e cúbico do PIB. A inclusão do PIB<sup>2</sup>, que apresenta um coeficiente positivo e significativo ao nível de 1% em todas as suas estimações, sugere que após certo ponto de desenvolvimento econômico, o aumento do PIB passa a ter um efeito positivo sobre as emissões de GEE, ou seja, as emissões voltam a crescer com o aumento do PIB. O PIB<sup>3</sup> apesar de não significativo, reforça a complexidade dessa relação.

Esse padrão sugere a presença de uma Curva Ambiental de Kuznets, indicando que, em estágios iniciais de desenvolvimento econômico, as emissões de GEE tendem a diminuir conforme o PIB cresce, provavelmente devido a adoção de tecnologias mais limpas e uma maior eficiência energética. No entanto, após atingir um determinado nível de renda, o crescimento econômico pode levar ao aumento das emissões, possivelmente devido a intensificação do consumo de energia e a industrialização, logo a curva de emissões apresenta um formato de “N”.

Esses achados são corroborados por estudos como o de Zhang et al. (2019), que utilizaram o modelo STIRPAT para analisar as emissões de carbono na China. Eles apontam que o PIB per capita é um dos fatores mais importantes que influenciam as emissões de carbono, com um efeito positivo significativo. Além disso, a estrutura energética e o crescimento populacional também desempenham papéis cruciais. De forma semelhante, Zheng et al. (2016) ao examinar as emissões de CO<sub>2</sub> em 73 cidades chinesas, encontraram uma relação não linear entre o PIB per capita e as emissões de carbono, sugerindo a presença da Curva Ambiental de Kuznets em diferentes níveis de desenvolvimento econômico.

No contexto brasileiro, Polloni *et al.* (2021) aplicaram o modelo STIRPAT para investigar os fatores que impulsionam as emissões de CO<sub>2</sub> relacionadas à energia nas diferentes

regiões do Brasil. Eles observaram que tanto as regiões mais ricas quanto as mais pobres apresentam desenvolvimentos econômicos e demográficos que são ambientalmente custosos. A intensidade energética crescente e a estagnação tecnológica foram identificadas como fatores que aumentam as emissões de CO<sub>2</sub> no Brasil. Esses resultados reforçam a complexidade da relação entre desenvolvimento econômico e emissões de GEE, destacando a importância de políticas regionais específicas para mitigar os impactos ambientais.

No que se refere aos setores econômicos, agropecuária, indústria e serviços, as variáveis não apresentaram significância estatística individualmente. Entretanto, o PIB, que agrega o valor adicionado pelos três setores, mostrou-se significativo, corroborando a relevância desses setores no conjunto. Os resultados de Xiong, Chen e Xu (2020) indicam que o setor agropecuário é particularmente intensivo em emissões de carbono em áreas rurais, o que também é observado no contexto de Minas Gerais, onde o setor agropecuário representa 41,3% das emissões de GEE (SEEG, 2022). Embora o coeficiente isolado desse setor não tenha sido significativo, é plausível que as regiões menos urbanizadas, onde predomina a atividade agropecuária, contribuam substancialmente para as emissões.

A variável urbanização apresentou um coeficiente negativo e significativo ao nível de 5%, sugerindo que, à medida que a taxa de urbanização aumenta, as emissões de GEE diminuem. Para cada aumento de 1% na urbanização, há uma redução média de 1,552% nas emissões de GEE. Zheng et al. (2016) pondera que, em cidades chinesas, o aumento da urbanização nem sempre leva diretamente à redução das emissões de GEE. Em muitos casos, a urbanização pode inicialmente aumentar as emissões, devido à maior demanda por energia e transporte. No entanto, o estudo também sugere que, em estágios mais avançados de urbanização, a eficiência energética tende a melhorar, com tecnologias mais limpas e uma melhor infraestrutura, o que pode, eventualmente, levar à redução das emissões. A urbanização, portanto, se destaca como uma importante variável no contexto de Minas Gerais, onde a atividade econômica em regiões mais urbanizadas pode estar associada a práticas mais sustentáveis, enquanto as áreas rurais, fortemente vinculadas à agropecuária, têm um impacto maior nas emissões.

Os coeficientes de determinação  $R^2_{within}$ ,  $R^2_{between}$  e  $R^2_{overall}$  fornecem uma medida da qualidade do ajuste dos modelos. O  $R^2_{within}$  é relativamente alto (0,957 a 0,958), indicando que os modelos explicam quase a totalidade da variação das emissões de GEE dentro dos grupos analisados. O  $R^2_{between}$  é baixo (0,038 a 0,041), sugerindo que há pouca variação explicada

entre os grupos. O  $R^2$ overall varia de 0,527 a 0,798, mostrando que os modelos têm uma capacidade moderada a alta de explicar a variação total das emissões de GEE.

#### 4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente estudo buscou analisar como um conjunto de setores impactaram nas emissões de GEE nos municípios de Minas Gerais entre os anos 2015 e 2019, analisando suas mais variadas características socioeconômicas.

Os resultados apontaram que o aumento populacional tem um impacto positivo nas taxas de emissões, enquanto o aumento do PIB apresenta uma relação inversa com as taxas de emissões de GEE. No entanto, quando considerado o PIB ao quadrado revela-se uma relação não linear, ou seja, as emissões diminuem até um certo ponto e depois voltam a subir. A taxa de urbanização também apresenta um coeficiente negativo, indicando que um aumento da taxa de urbanização diminui em média as emissões de GEE. As variáveis agropecuária, indústria e serviços não apresentaram significância estatística quando consideradas isoladamente, porém o PIB que incorpora todos os setores foi significativo ao nível de 1% de significância.

Compreender como as características regionais se comportam é importante para auxiliar na futura tomada de decisões governamentais acerca do aquecimento global, no intuito de incrementar a eficiência das políticas ambientais, haja visto que é mais efetivo agir localmente com foco nos principais pontos a melhorar de cada região, que criar uma solução uniforme para um país inteiro, sem considerar sua heterogeneidade ao longo do território.

Por fim, este estudo teve o intuito de contribuir com o debate a respeito do aquecimento global e suas diversas implicações socioeconômicas, trazendo à tona elementos regionais que afetam as emissões de GEE, reforçando a importância de ações locais coordenadas e eficazes para proteger o meio ambiente e garantir um futuro sustentável.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANSER, Muhammad Khalid. Impact of energy consumption and human activities on carbon emissions in Pakistan: application of STIRPAT model. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 26, n. 13, p. 13453-13463, 2019.
- BARROS, P. H. B. de; STEGE, A. L. Deforestation and human development in the Brazilian agricultural frontier: an environmental Kuznets curve for MATOPIBA. **Revista Brasileira de Estudos Regionais e Urbanos**, [S. l.], v. 13, n. 2, p. 161–182, 2019.
- BERCHIELLI, Telma Teresinha; MESSANA, Juliana Duarte; CANESIN, Roberta Carrilho. Produção de metano entérico em pastagens tropicais. **Revista Brasileira de Saúde e Produção Animal**, 2012, 13: 954-968.
- DIETZ, Thomas; ROSA, Eugene A. Rethinking the environmental impacts of population, affluence and technology. **Human Ecology Review**, 1994, 1.2: 277-300.
- EHRILICH, P. R.; HOLDREN, J. P. Impact of Population Growth. **Science**, v.171, p.1212-1217, 1971.
- FUNDAÇÃO JOÃO PINHEIRO. Índice Mineiro de Responsabilidade Social - IMRS. 2023. Disponível em: <https://imrs.fjp.mg.gov.br/>. Acesso em: 20 mai. 2024.
- GROSSMAN, G.; KRUEGER, A. Environmental impacts of a North American free trade agreement. **NBER, National Bureau of Economic Research Working Paper 3914**.
- GUJARATI, Damodar N.; PORTER, Dawn C. **Econometria básica-5**. Amgh Editora, 2011.
- INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **Climate Change 2014: Synthesis Report**. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 151 p, 2014.
- LEITE, Vinicius Pazini; DEBONE, Daniela; MIRAGLIA, Simone Georges El Khouri. Emissões de gases de efeito estufa no estado de São Paulo: análise do setor de transportes e impactos na saúde. **VITTALLE-Revista de Ciências da Saúde**, 2020, 32.3: 143-153.
- LI, Bo; LIU, Xuejing; LI, Zhenhong. Using the STIRPAT model to explore the factors driving regional CO2 emissions: a case of Tianjin, China. **Natural Hazards**, v. 76, p. 1667–1685, 2015.
- LIN, Shoufu; ZHAO, Dingtao; MARINOVA, Dora. "Analysis of the environmental impact of China based on STIRPAT model." **Environmental Impact Assessment Review**, v. 29, n. 6, p. 341-347, 2009.

LIU, Xiaoping; OU, Jinpei; CHEN, Yimin; WANG, Shaojian; LI, Xia; JIAO, Limin; LIU, Yaolin. Scenario simulation of urban energy-related CO<sub>2</sub> emissions by coupling the socioeconomic factors and spatial structures. **Applied Energy**, v. 238, p. 1163-1178, 2019.

MARQUES, L. D. **Modelos dinâmicos com dados em painel**: revisão da literatura. Série Working Papers do Centro de Estudos Macroeconômicos e Previsão (CEMPRE) da Faculdade de Economia do Porto, Portugal, n. 100, 2000.

OLIVEIRA, Elizabeth; DE AZEVEDO IRVING, Marta; COUTINHO, Gabriella. A quem interessa a causa dos refugiados climáticos? Dilemas, perspectivas e o papel da mídia. **Razón y Palabra**, n. 84, 2013.

OBSERVATÓRIO DO CLIMA. Plataforma SEEG: Minas Gerais. Disponível em: <https://plataforma.seeg.eco.br/territorio/minas-gerais>. Acesso em: 15 ago. 2024.

PATARASUK, Risa, et al. Urban high-resolution fossil fuel CO<sub>2</sub> emissions quantification and exploration of emission drivers for potential policy applications. **Urban Ecosystems**, 2016, 19: 1013-1039.

POLLONI-SILVA, Eduardo; SILVEIRA, Najjela; FERRAZ, Diogo; MELLO, Diego Scarpa de; MORALLES, Herick Fernando. The drivers of energy-related CO<sub>2</sub> emissions in Brazil: a regional application of the STIRPAT model. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 28, p. 51745–51762, 2021.

SHAHBAZ, Muhammad *et al.* How urbanization affects CO<sub>2</sub> emissions in Malaysia? The application of STIRPAT model. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 57, p. 83-93, 2016.

SILVA DE CASTRO, A.; DA SILVA ALVES, J.; CAIXETA ANDRADE, D. Crescimento econômico e emissões de CO<sub>2</sub> no BRICS: uma análise de cointegração em painel. **Economia Aplicada**, [S. l.], v. 23, n. 2, p. 183-208, 2019.

SILVA, R. W. da C.; PAULA, B. L. de. Causa do aquecimento global: antropogênica versus natural. **Terrae Didactica**, Campinas, SP, v. 5, n. 1, p. 42–49, 2015.

Site da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudanças Climáticas (UNFCCC). Disponível em: <https://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement/the-paris-agreement>. Acesso em: 05/06/2024

SOARES, Thiago Costa; CUNHA, Dênis Antônio da. Emissões de gases de efeito estufa e eficiência ambiental no Brasil. **Nova Economia**, 2019, 29.2: 429-458.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **Overview of Greenhouse Gases**. Disponível em: [tps://www.epa.gov/ghgemissions/overview-greenhouse-gases](https://www.epa.gov/ghgemissions/overview-greenhouse-gases). Acesso em: 10 jul. 2024.

VALERETTO, Gerson João; CONSTANTINO, Michel. Estimativa do Impacto dos Setores Produtivos nas Emissões de CO<sub>2</sub>e: Evidências para o Brasil (2000-2015). **Razão Contábil e Finanças**, 2020, 11.2.

VÉLEZ-HENAO, J.-A.; VIVANCO, D. F.; HERNÁNDEZ-RIVEROS, J.-A. Technological change and the rebound effect in the STIRPAT model: A critical view. **Energy Policy**, v.129, p.1372-1381, 2019

WANG, Mansi; ARSHED, Noman; MUNIR, Mubbasher; RASOOL, Samma Faiz; LIN, Weiwen. Investigation of the STIRPAT model of environmental quality: a case of nonlinear quantile panel data analysis. **Environment, Development and Sustainability**, v. 23, n. 8, p. 12217-12232, 2021.

WANG, Ping; WU, Wanshui; ZHU, Bangzhu; WEI, Yi-Ming. Examining the impact factors of energy-related CO<sub>2</sub> emissions using the STIRPAT model in Guangdong Province, China. **Applied Energy**, v. 106, p. 65-71, 2013.

XIONG, Chuanhe; CHEN, Shuang; XU, Liting. Driving factors analysis of agricultural carbon emissions based on extended STIRPAT model of Jiangsu Province, China. **Growth and Change**, v. 51, n. 3, p. 1401-1416, 2020.

YORK, Richard; ROSA, Eugene A.; DIETZ, Thomas. STIRPAT, IPAT and ImPACT: analytic tools for unpacking the driving forces of environmental impacts. **Ecological economics**, 2003, 46.3: 351-365.

ZHANG, Yue-Jun; LIU, Zhao; ZHANG, Huan; TAN, Tai-De. The impact of economic growth, industrial structure and urbanization on carbon emission intensity in China. **Natural Hazards**, v. 73, p. 579–595, 2014.

ZHANG, Yulong; ZHANG, Qingyu; PAN, Binbin. Impact of affluence and fossil energy on China carbon emissions using STIRPAT model. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 26, p. 18814–18824, 2019.

ZHENG, Haitao, *et al.* Examining determinants of CO<sub>2</sub> emissions in 73 cities in China. **Sustainability**, 2016, 8.12: 1296.