

Emissões de gases de efeito estufa no Brasil: impacto do consumo de energia e da indústria (1990-2023)

Greenhouse gas emissions in Brazil: impact of energy consumption and industry (1990-2023)

Patricia Figueiredo Stefani

Universidade Federal de Santa Maria. Palmeira das Missões, RS, Brasil

Geferson Gustavo Wagner Mota da Silva

Universidade Federal de Santa Maria. Palmeira das Missões, RS, Brasil

Alessandro de Oliveira Rodrigues

Universidade Federal de Santa Maria. Palmeira das Missões, RS, Brasil

Eliane Ott dos Reis

Universidade Federal de Santa Maria. Palmeira das Missões, RS, Brasil

Raissa Ochôa Golin

Universidade Federal de Santa Maria. Palmeira das Missões, RS, Brasil

GT 04 - Meio ambiente, agroecologia, sustentabilidade e mudanças climáticas

Resumo: As emissões de gases de efeito estufa (GEE) figuram entre os mais graves problemas ambientais da atualidade, com repercussões particularmente intensas em nações de industrialização mais recente, a exemplo do Brasil. O uso de energia e o setor industrial constituem elementos centrais na configuração dessas emissões, afetando de maneira significativa o perfil ambiental do território nacional. Este trabalho busca identificar os fatores que mais influenciam as emissões per capita de gases de efeito estufa no Brasil ao longo do período de 1990 a 2023, concentrando-se especialmente nos efeitos do consumo energético e da produção industrial, a fim de mensurar o impacto dessas variáveis e examinar seus reflexos sobre estratégias governamentais de descarbonização e de desenvolvimento sustentável. Por meio de um modelo econométrico baseado em Mínimos Quadrados Ordinários (MQO) com especificação log-log, calculam-se as elasticidades das emissões relativamente ao consumo de energia per capita e ao índice real do produto industrial. Procede-se à aplicação de testes para detecção de autocorrelação, heterocedasticidade e multicolinearidade, adotando-se as correções metodológicas cabíveis para assegurar a consistência das conclusões obtidas. Os achados são interpretados à luz da produção acadêmica existente e das orientações para políticas públicas voltadas à transição energética e ao desenvolvimento sustentável.

Palavras-chave: EMISSÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA, CONSUMO DE ENERGIA, ATIVIDADE INDUSTRIAL, BRASIL; ECONOMETRIA.

Abstract: Greenhouse gas (GHG) emissions rank among the most serious environmental problems of our time, with particularly intense repercussions in more recently industrialized nations, such as Brazil. Energy use and the industrial sector are central elements in the configuration of these emissions, significantly affecting the environmental profile of the country. This study seeks to identify the factors that most influence per capita greenhouse gas emissions in Brazil over the period from 1990 to 2023, focusing especially on the effects of energy consumption and industrial production, in order to measure the impact of these variables and examine their implications for government strategies aimed at decarbonization and sustainable development. Using an econometric model based on Ordinary Least Squares (OLS) with a log-log specification, the elasticities of emissions with respect to per capita energy consumption and the real industrial product index are estimated. Tests for autocorrelation, heteroscedasticity, and multicollinearity are applied, with appropriate methodological corrections adopted to ensure the robustness of the findings. The results are interpreted in light of the existing academic literature and guidelines for public policies focused on energy transition and sustainable development.

Keywords: GREENHOUSE GAS EMISSIONS, ENERGY CONSUMPTION, INDUSTRIAL ACTIVITY, BRAZIL, ECONOMETRICS.

1. Introdução

Os gases de efeito estufa (GEE) constituem um dos mais relevantes dilemas ambientais contemporâneos, com destaque para nações em estágio de desenvolvimento, como é o caso do Brasil. O emprego de energia e o setor produtivo industrial figuram como elementos fundamentais na evolução dessas emissões, impactando diretamente a qualidade ambiental do país. Adicionalmente, o aumento demográfico e o aquecimento planetário trazem obstáculos consideráveis à elaboração de estratégias governamentais.

O processo de urbanização e a elevação da concentração populacional, geralmente acompanhados do crescimento econômico, acentuam a demanda por ações estatais destinadas a reduzir os efeitos ambientais adversos (Hilber; Palmer, 2014). Historicamente, essas transformações sucedem em conjunto com o avanço da economia e o incremento da renda, gerando também consequências ecológicas indesejáveis como subproduto relevante da vida nos centros urbanos. Identificar de que maneira essas variáveis influenciam as emissões mostra-se essencial para embasar medidas públicas direcionadas ao enfrentamento das alterações climáticas e ao fomento do desenvolvimento sustentável.

O parque industrial brasileiro recorre a distintas fontes energéticas para manter seu funcionamento. A energia elétrica se sobressai como a principal e mais frequente, sendo utilizada em máquinas, sistemas de iluminação e automação, podendo ser obtida junto a distribuidoras ou gerada internamente para consumo próprio. Além disso, o segmento industrial emprega de modo expressivo combustíveis de origem fóssil, como gás natural e carvão, indispensáveis para prover calor em processos de aquecimento e produção de vapor (EPE, 2023).

O crescimento das emissões de CO₂ encontra-se diretamente relacionado ao consumo energético mundial. Conforme Goldemberg e Lucon (2007), a partir da Revolução Industrial, tornou-se necessário empregar maiores quantidades de carvão, petróleo e gás — fontes energéticas que envolvem elevados custos tanto de extração quanto de transporte. Além disso, os padrões vigentes de produção e utilização de energia ainda provêm majoritariamente de fontes fósseis, o que acarreta considerável liberação de poluentes e gases de efeito estufa, podendo comprometer a oferta planetária no longo prazo.

Nos últimos anos, verifica-se um crescimento notável do interesse pela incorporação de fontes renováveis à matriz energética do setor industrial brasileiro, tais como energia solar, eólica e biomassa. Essa tendência visa diminuir as emissões de carbono e fomentar maior

sustentabilidade, particularmente na indústria química. A problemática das emissões de poluentes tornou-se central no debate acerca do consumo energético industrial, uma vez que esse setor ocupa a segunda posição entre os maiores emissores de CO₂ por uso de energia, ficando atrás unicamente do setor de transportes (EPE, 2023).

O conhecimento dos fatores que determinam as emissões de GEE é imprescindível para o enfrentamento dos desafios ecológicos do século XXI, mormente em nações em desenvolvimento como o Brasil. O crescimento populacional, a expansão urbana, o consumo de energia e o desempenho da indústria são elementos-chave na trajetória dessas emissões, demandando a formulação de políticas públicas efetivas para mitigar impactos adversos e incentivar o desenvolvimento sustentável. Nesse contexto, o presente trabalho — que divulga resultados parciais já apresentados por Stefani et al. (2026) — procura responder à seguinte questão: De que maneira o consumo de energia per capita e o desempenho da atividade industrial impactam as emissões de gases de efeito estufa per capita no Brasil no período compreendido entre 1990 e 2023?

O objetivo central consiste em examinar os principais determinantes das emissões de gases de efeito estufa per capita no Brasil de 1990 a 2023, com especial atenção ao papel do consumo de energia e da atividade industrial, utilizando instrumental econométrico para estimar o efeito dessas variáveis e analisar suas repercussões para políticas públicas orientadas à transição energética e ao desenvolvimento sustentável. Mais especificamente, o estudo busca: (i) estimar as elasticidades das emissões de gases de efeito estufa per capita em relação ao consumo de energia per capita e ao índice real do PIB industrial no Brasil entre 1990 e 2023, empregando um modelo econométrico de mínimos quadrados ordinários (MQO) com especificação *log-log*; (ii) aplicar testes estatísticos de diagnóstico (autocorrelação, heterocedasticidade e multicolinearidade) e realizar correções metodológicas apropriadas para assegurar a robustez dos achados; (iii) discutir as implicações dos resultados para políticas públicas voltadas à transição energética, à ampliação de fontes renováveis e à promoção da eficiência industrial no Brasil.

2. Referencial teórico

O referencial teórico analisa as emissões de GEE per capita no Brasil a partir de três eixos: transição energética, determinantes das emissões (energia, indústria e aspectos socioeconômicos) e políticas públicas de mitigação (eficiência, diversificação da matriz e

integração setorial), visando subsidiar a transição para uma economia de baixo carbono e o desenvolvimento sustentável.

2.1. Teoria da transição energética

A noção de transição energética diz respeito ao processo de reestruturação profunda dos modos de geração, distribuição e utilização de energia, marcado pela gradativa substituição de combustíveis de origem fóssil por fontes renováveis e com reduzido impacto ecológico (IEA, 2020; Goldemberg; Lucon, 2007). Essa transformação resulta tanto de inovações tecnológicas quanto de exigências regulatórias e demandas sociais, com o propósito de diminuir as emissões de gases de efeito estufa, ampliar a variedade da matriz energética e aumentar a confiabilidade do abastecimento (EPE, 2023; Sovacool, 2016).

Conforme argumenta Geels (2011), a transição energética pode ser interpretada como um fenômeno de mudança sociotécnica que ocorre em múltiplas dimensões e escalas, envolvendo não meramente a troca de equipamentos, mas também alterações em marcos regulatórios, dinâmicas de mercado, práticas culturais e arranjos institucionais. Ressalta-se que essas transições se concretizam por meio da interação entre espaços de inovação, sistemas consolidados e contextos socioeconômicos mais amplos, sendo impulsionadas por forças externas e internas que remodelam o sistema energético em direção a alternativas mais sustentáveis.

No cenário brasileiro, a transição energética adquire importância diante da necessidade de conciliar o avanço econômico e industrial com o compromisso de reduzir os danos ambientais, incentivando a adoção de fontes limpas, como a hidrelétrica, eólica, solar e biomassa, bem como fomentando soluções inovadoras que promovam o uso eficiente da energia e a descarbonização das cadeias produtivas (OBSERVATÓRIO DO CLIMA, 2023; EPE, 2023; Goldemberg; Lucon, 2007). Dessa maneira, o conhecimento dos fundamentos e obstáculos associados à transição energética mostra-se essencial para embasar a criação de políticas públicas eficientes e orientar decisões empresariais alinhadas aos propósitos do desenvolvimento sustentável (Sovacool, 2016; EPE, 2023).

2.2. Determinantes das emissões (energia, indústria e aspectos socioeconômicos)

Múltiplos fatores afetam as emissões de gases de efeito estufa (GEE) no Brasil e em outras nações em processo de desenvolvimento. Entre os mais relevantes, figuram o aumento demográfico, o uso de energia e o desempenho do setor industrial. Estudos realizados em

âmbito nacional e internacional indicam que o crescimento da população eleva a necessidade por energia, meios de transporte, alimentos e estruturas urbanas, contribuindo diretamente para o aumento das emissões de GEE. De acordo com investigações recentes, a expansão populacional está vinculada ao maior consumo de recursos naturais e à ampliação das áreas urbanas, agravando a pressão sobre os sistemas energéticos e industriais (OBSERVATÓRIO DO CLIMA, 2023; EPE, 2023; GEELS, 2011).

O consumo de energia continua sendo um dos fatores mais relevantes associados às emissões de GEE, especialmente em razão do predomínio de combustíveis fósseis na matriz energética mundial (IEA, 2023; OBSERVATÓRIO DO CLIMA, 2023). Mesmo no Brasil, onde as fontes renováveis têm participação expressiva, a utilização de petróleo e seus derivados ainda responde por uma parcela considerável das emissões totais (EPE, 2023). Pesquisas recentes mostram que o consumo energético per capita tende a acompanhar o crescimento econômico, o que favorece o incremento das emissões de GEE, ainda que haja processos de transição energética e ampliação de fontes limpas (IEA, 2023; OBSERVATÓRIO DO CLIMA, 2023; EPE, 2023).

A atividade industrial exerce papel central na evolução das emissões de gases de efeito estufa, sobretudo em ramos de alta demanda energética, como as indústrias siderúrgica, cimenteira e química. Esses segmentos contribuem de maneira significativa para o aumento das emissões, tanto pelo elevado consumo de energia quanto pelas particularidades intrínsecas de seus métodos produtivos (Zhang et al., 2017; Crippa et al., 2021).

Estudos demonstram que o crescimento do valor agregado pela indústria está associado à elevação das emissões, indicando que ganhos em eficiência energética e inovações tecnológicas são fundamentais para reduzir tais impactos (IEA, 2021; Sorrel, 2015). Abordagens econométricas, como as desenvolvidas por Stern (2010) e Wang et al. (2019), corroboram a relação significativa entre consumo energético, desempenho industrial e emissões per capita, evidenciando a necessidade de estratégias integradas para a redução das emissões no âmbito nacional.

Para além desses aspectos, variáveis socioeconômicas, como o nível de renda per capita, as disparidades sociais e as práticas sustentáveis adotadas localmente, também interferem na eficiência ambiental e nas emissões regionais (York et al., 2003; Fan et al., 2006). Portanto, a adoção de políticas públicas orientadas à transição energética, à difusão de fontes renováveis e ao incentivo à eficiência industrial é considerada estratégica para enfrentar os desafios oriundos do crescimento populacional e do desenvolvimento econômico, promovendo a redução das

emissões de GEE e viabilizando uma trajetória sustentável para o Brasil (Raupach et al., 2007; IEA, 2021).

2.3. Políticas públicas de mitigação

A melhoria do aproveitamento energético é amplamente reconhecida como componente essencial para a redução das emissões de GEE, particularmente nos ramos industriais de alto consumo. Conforme apontam os trabalhos de Patterson (1996) e Lomas et al. (2012), as estratégias governamentais voltadas à eficiência energética podem abranger a fixação de requisitos mínimos de rendimento, benefícios fiscais para a adoção de equipamentos modernos, linhas de crédito específicas e sistemas de classificação energética. Tais medidas favorecem a queda do uso de energia por unidade fabricada, diminuem despesas operacionais e emissões, além de elevar a competitividade do parque industrial.

A ampliação da variedade da matriz energética mostra-se fundamental para garantir a solidez do sistema e reduzir a dependência de combustíveis fósseis. Segundo as investigações de Jacobson; Delucchi (2011) e Sovacool (2009), políticas públicas adequadamente concebidas nessa área englobam o planejamento integrado de recursos, o apoio a projetos de pesquisa e desenvolvimento de tecnologias emergentes, bem como a criação de mecanismos de mercado que estimulem fontes energéticas mais sustentáveis. O incremento da participação de opções como hidrelétrica, eólica, solar e biomassa reforça a segurança do abastecimento energético e auxilia no cumprimento das metas de diminuição de emissões.

Ainda no âmbito das iniciativas destinadas a reduzir as emissões de GEE e promover o desenvolvimento sustentável, ressalta-se a importância de articular e integrar políticas públicas entre as áreas de energia, indústria e meio ambiente. Essa abordagem sinérgica permite otimizar resultados, potencializar ganhos em eficiência e assegurar que as medidas de mitigação sejam mais abrangentes e efetivas. Conforme destacam Meadowcroft (2011) e Kern; Howlett (2009), a coordenação entre distintas esferas governamentais é essencial para transpor obstáculos setoriais, evitar duplicidades e fomentar soluções inovadoras que impulsionem o avanço rumo a uma economia de baixo carbono.

Dentre as recomendações de política pública derivadas da literatura, destacam-se: a ampliação de programas de eficiência energética nos setores de alta intensidade, com estabelecimento de metas e estímulos à inovação tecnológica (Sorrell et al., 2004); o incentivo à diversificação e descentralização da matriz energética por meio de fontes renováveis (Hvelplund, 2006; Lund, 2007); a expansão de mecanismos financeiros e regulatórios para

pesquisa e desenvolvimento de tecnologias limpas (Johnstone et al., 2010); o reforço da regulação ambiental com práticas de monitoramento, transparência e engajamento da sociedade (Fiorino et al., 2006); e a integração das políticas de energia, indústria e meio ambiente para maximizar os resultados na mitigação das emissões e no desenvolvimento sustentável (Meadowcroft, 2011; Kern; Howlett, 2009).

Essas ações, implementadas de maneira conjunta, visam conciliar o crescimento econômico brasileiro com a redução das emissões de GEE, promovendo uma transição energética eficiente e sustentável.

3. Metodologia

A presente investigação adota uma metodologia quantitativa, fundamentada em ferramentas econométricas, com o propósito de examinar os fatores determinantes das emissões de gases de efeito estufa (GEE) per capita no Brasil ao longo do intervalo de 1990 a 2023. Este trabalho constitui uma das etapas do estudo mais amplo desenvolvido por Stefani et al. (2026).

Para avaliar a relação entre as emissões de GEE, o consumo de energia e o desempenho industrial no país, estimou-se um modelo de Mínimos Quadrados Ordinários (MQO) na forma funcional log-log. Essa especificação tem a vantagem de permitir que os coeficientes obtidos sejam interpretados diretamente como elasticidades. O modelo estimado para o período de 1990 a 2023 encontra-se representado pela Equação 1.

$$\ln(Gee_{pct}) = B_0 + B_1 \cdot \ln(Consumo_{energia_{pct}}) + B_2 \cdot \ln(PIB_{Indust}) + \varepsilon_t \quad (1)$$

Onde $\ln(Gee_{pct})$ é o logaritmo das emissões de GEE per capita no ano t ; $\ln(Consumo_{energia_{pct}})$ é o logaritmo do consumo de energia per capita no ano t ; $\ln(PIB_{Indust})$ é o logaritmo do índice real do PIB industrial no ano t ; e ε_t é o termo de erro estocástico (Stefani et al., 2026).

Foram empregados dados anuais referentes ao Brasil, abrangendo o período de 1990 a 2023. As informações relativas às emissões de GEE per capita e ao consumo de energia per capita foram obtidas junto ao Banco Mundial (World Bank), enquanto os dados do índice real do PIB industrial foram extraídos do Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (IPEA). A opção por essas bases de dados justifica-se pela sua confiabilidade, amplitude e pela existência de séries históricas consistentes para o intervalo temporal analisado (Stefani et al., 2026).

Todas as análises econométricas foram conduzidas por meio do *software EViews*, sob licença especial temporária para estudantes, ferramenta amplamente adotada em estudos acadêmicos para a estimação de modelos de séries temporais, realização de testes de diagnóstico e aplicação de correções robustas. O *EViews* possibilita a execução de testes estatísticos, a estimação de modelos com correção para autocorrelação e heterocedasticidade, além de facilitar a análise gráfica dos resíduos e dos resultados obtidos (Stefani et al., 2026).

4. Discussão dos resultados

A primeira etapa de estimação utilizando Mínimos Quadrados Ordinários (MQO), exibida na Tabela 1, adotou como variável dependente o logaritmo natural das emissões de CO₂ provenientes do setor agropecuário brasileiro entre 1990 e 2023. As variáveis explicativas, também transformadas em logaritmos, referem-se ao valor adicionado da agropecuária e ao número de pessoas ocupadas na agricultura. Os coeficientes obtidos para ambas as variáveis independentes mostraram-se positivos e estatisticamente significativos ao nível de 1% ($p < 0,01$), sugerindo que tanto a expansão econômica do setor quanto o aumento do emprego agrícola estão correlacionados com o incremento das emissões agropecuárias.

Tabela 1- Estimação inicial

Dependent Variable:		LOG(EMISSOES_CO2_AGRI)		
Method:	Least Squares			
Date:	10/06/25 Time 17:18			
Sample:	1990 2023			
Included observations:	34			
Variable	Coefficient	Std.Error	T-Statistic	Prob
C	-6.411686	0.892537	-7.183661	0.0000
LOG(VALOR_ADICIONADO_AGRO	1.364500	0.209663	6.508055	0.0000
LOG(EMPREGO_AGRICULTURA)	0.495567	0.030906	16.03468	0.0000
R-squared	0.920513	Mean dependente var		1.704666
Adjusted R-squared	0.915385	S.D dependente var		0.098745
S.E. of regression	0.028723	Akaike info criterion		-4.178106
Sum squared resid	0.025576	Schwarz criterion		-4.043427
Log likelihood	74.02780	Hannan-Quinn criter		-4.132177
F-statistic	179.5007	Dubin-Watson stat		0.548699
Prob(F-statistic)	0.000000			

Fonte: Stefani et al. (2026).

O exame dos resíduos provenientes da regressão revelou um quadro relevante de autocorrelação serial. O valor calculado da estatística Durbin–Watson ($DW = 0,5487$) situa-se bem distante do patamar esperado em torno de 2, o que sinaliza uma forte autocorrelação positiva de primeira ordem. Essa violação do pressuposto de independência dos termos de erro compromete a confiabilidade dos erros-padrão e das estatísticas t , exigindo a aplicação de procedimentos robustos a fim de assegurar a validade inferencial do modelo (Stefani et al., 2026).

Conforme apresentado na Tabela 2, a presença de multicolinearidade foi avaliada por meio dos Fatores de Inflação da Variância (VIF). Os valores dos VIF centrados foram de 1,045 para ambas as variáveis independentes, patamares bastante reduzidos e muito próximos do valor de referência ideal (1). Esses achados confirmam a inexistência de correlação linear significativa entre os regressores, assegurando que os coeficientes estimados não apresentam distorções decorrentes de dependência linear excessiva entre as variáveis explicativas. Portanto, a interpretação econômica dos coeficientes mantém-se válida e confiável (Stefani et al., 2026).

Tabela 2 - VIF

Variance Inflation Factors			
Date: 10/06/25 Time 17:06			
Sample: 1990 2023			
Included observations: 34			
Variable	Coefficient Variance	Uncentered VIF	Centered VIF
C	0.796623	32828.99	NA
LOG(CONSUMO_EN)	0.043959	34209.65	1.045975
LOG(PIB_INDUS)	0.000955	767.5787	1.045975

Fonte: Stefani et al. (2026).

Com o objetivo de verificar a existência de heterocedasticidade, empregou-se o teste de White. Os resultados obtidos apontam para a ausência de evidências estatísticas de variância não constante nos resíduos do modelo. Os valores de $\text{Prob.}(F) = 0,2090$ e $\text{Prob.}(\text{Obs} \cdot R^2) = 0,1955$, ambos superiores ao patamar de significância de 5%, levam à aceitação da hipótese nula de homoscedasticidade (Stefani et al., 2026).

A equação auxiliar dos resíduos ao quadrado corrobora essa conclusão, uma vez que nenhum coeficiente se mostrou estatisticamente significativo e o R^2 da regressão auxiliar

(0,1779) manteve-se bastante baixo, indicando reduzida capacidade de explicação da variância dos resíduos, conforme demonstrado na Tabela 3.

Tabela 3 - Teste de Heterocedasticidade

Heteroskedasticity Test: White				
Null hypothesis: Homoskedasticity				
F-statistic	1.568886	Prob. F(7,8)	0.2090	
Obs*R-squared	6.048623	Prob. Chi-Square(7)	0.1955	
Scaled explained SS	2.882558	Prob. Chi-Square(7)	0.5777	
Teste Equation				
Dependent Variable: RESID^2				
Method: Least Squares				
Date: 10/06/25 Time 17:09				
Sample: 1990 2023				
Included observations: 34				
Variable	Coefficient	Std.Error	T-Statistic	Prob
C	-0.343186	0.402634	-0.852353	0.4010
LOG(CONSUMO_ENERGIA_PC)^2	0.020483	0.022563	0.907828	0.3715
LOG(CONSUMO_ENERGIA_PC)*LOG	-0.037290	0.044523	-0.837541	0.4091
LOG(PIB_INDUS)^2	0.002044	0.005848	0.349425	0.7293
LOG(PIB_INDUS)	0.143308	0.183947	0.779073	0.4422
R-squared	0.177901	Mean dependente var	0.000752	
Adjusted R-squared	0.064508	S.D dependente var	0.000818	
S.E. of regression	0.000791	Akaike info criterion	-11.31207	
Sum squared resid	1.81E-05	Schwarz criterion	-11.08760	
Log likelihood	197.3051	Hannan-Quinn criter	-11.23552	
F-statistic	1.568886	Dubin-Watson stat	1.621586	
Prob(F-statistic)	0.209041			

Fonte: Stefani et al. (2026).

Portanto, a única irregularidade econométrica detectada na formulação original do modelo refere-se à autocorrelação serial dos resíduos, enquanto os requisitos de homocedasticidade e inexistência de multicolinearidade foram adequadamente cumpridos (Stefani et al., 2026).

Conforme Stefani et al. (2026), diante da identificação de autocorrelação positiva, realizou-se uma nova estimação do modelo com o emprego de erros-padrão robustos de Newey–West (HAC), adotando-se banda fixa de quatro defasagens e kernel de Bartlett. Esse procedimento promove o ajuste da matriz de variâncias e covariâncias de maneira consistente quando há autocorrelação e eventuais formas brandas de heterocedasticidade, garantindo a legitimidade das inferências estatísticas, conforme evidenciado na Tabela 4.

Tabela 4 - Correção de Newey–West (HAC)

Dependent Variable:	LOG(EMISSOES_CO2_AGR)			
Method:	Least Squares			
Date:	10/06/25 Time 17:18			
Sample:	1990 2023			
Included observations:				
HAC standar erros & covariance (Bartlett kernel, Newey-West fixed bandwidth = 4.0000)	34			
Variable	Coefficient	Std.Error	T-Statistic	Prob
C	-6.411686	1.667652	-3.844740	0.0006
LOG(VALOR_ADICIONADO_AGRO	1.364500	0.396985	3.437155	0.0017
LOG(EMPREGO_AGRICULTURA)	0.495567	0.041208	12.02597	0.0000
R-squared	0.920513	Mean dependente var		1.704666
Adjusted R-squared	0.915385	S.D dependente var		0.098745
S.E. of regression	0.028723	Akaike info criterion		-4.178106
Sum squared resid	0.025576	Schwarz criterion		-4.043427
Log likelihood	74.02780	Hannan-Quinn criter		-4.132177
F-statistic	179.5007	Dubin-Watson stat		0.548699
Prob(F-statistic)	0.000000	Wald F-statistic		104.2241
Prob(Wald F-statistic)	0.000000			

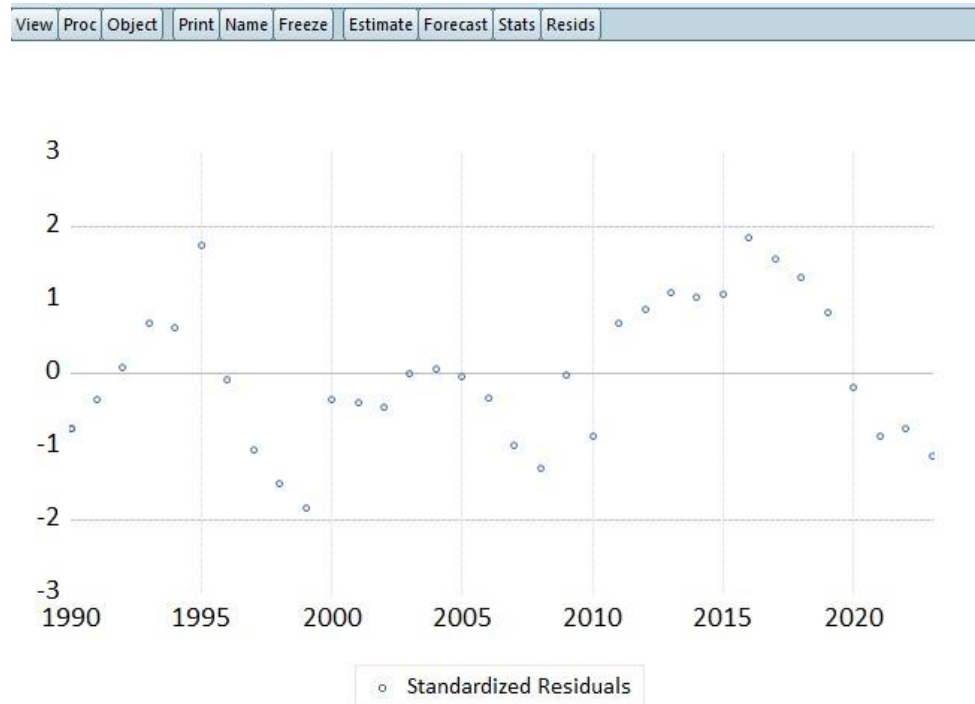
Fonte: Stefani et al. (2026).

O coeficiente de elasticidade das emissões em relação ao consumo de energia per capita foi de 1,36, indicando que uma elevação de 1% no uso de energia corresponde a um acréscimo de 1,36% nas emissões de GEE, caracterizando um efeito elástico e estatisticamente relevante (p-valor = 0,0017). Já a elasticidade em relação ao índice do PIB industrial foi de 0,50, sugerindo que um incremento de 1% na produção industrial está associado a um aumento de 0,50% nas emissões, tratando-se de um efeito inelástico, porém igualmente muito significativo (p-valor = 0,0000). Portanto, o modelo final estimado com correção HAC constitui a especificação mais adequada, sob a perspectiva econométrica, para explicar as emissões agropecuárias no Brasil durante o período analisado (Stefani et al., 2026).

Ainda para Stefani et al. (2026), a inspeção visual dos resíduos padronizados ao longo da série temporal evidencia um comportamento claramente não aleatório, corroborando o diagnóstico de autocorrelação previamente apontado pela estatística Durbin–Watson. Nota-se que, em determinados períodos, os resíduos exibem trajetórias persistentemente acima ou abaixo da linha de zero, formando aglomerados temporais que contrariam o pressuposto de independência serial. Entre 1990 e 1995, por exemplo, os resíduos mostram-se predominantemente positivos, ao passo que no intervalo de aproximadamente 1997 a 2005

prevalecem valores negativos. A partir de 2010, observa-se novamente uma fase de resíduos positivos, seguida de nova inversão após 2018.

Figura 1 - Gráfico de resíduos



Fonte: Stefani et al. (2026).

Dessa maneira, a representação gráfica dos resíduos padronizados oferece uma confirmação visual consistente com os achados estatísticos previamente reportados. O comportamento sistematicamente não aleatório observado ao longo da série temporal — com prolongados períodos de resíduos predominantemente positivos seguidos por intervalos de valores negativos — está em perfeita consonância com o diagnóstico de autocorrelação positiva obtido por meio do teste de Durbin–Watson, cuja estatística calculada ($DW = 0,5487$) mostrou-se bastante distante do valor ideal próximo de 2. Essa evidência gráfica, somada ao resultado do teste estatístico, corrobora a violação do pressuposto de independência dos erros e reforça a necessidade de se adotar procedimentos econométricos capazes de lidar adequadamente com a dependência serial presente nos resíduos do modelo. Diante desse cenário, a aplicação do método de correção HAC (Newey–West) na reestimação do modelo revela-se plenamente justificada, uma vez que esse procedimento ajusta a matriz de variâncias e covariâncias de forma robusta, garantindo inferências estatisticamente válidas e assegurando a consistência dos erros-padrão, mesmo na presença de autocorrelação e de eventuais formas brandas de heterocedasticidade (Stefani et al., 2026).

5. Considerações finais

Os achados obtidos demonstram que o consumo de energia per capita exerce uma influência mais do que proporcional sobre as emissões de gases de efeito estufa (elasticidade de 1,36), o que reflete a ainda significativa dependência da matriz energética brasileira em relação a combustíveis de origem fóssil. Embora o setor industrial também contribua de maneira relevante para as emissões, seu impacto mostrou-se menos que proporcional (elasticidade de 0,50), sugerindo a ocorrência de ganhos de eficiência energética ao longo do período analisado ou uma transição gradual rumo a segmentos produtivos com menor intensidade de carbono. Esses resultados estão em consonância com investigações anteriores que apontam o papel central do consumo energético e do desempenho industrial como determinantes das emissões em âmbito nacional, compondo parte significativa dos achados originalmente reportados por Stefani et al. (2026).

A literatura especializada enfatiza a necessidade de políticas públicas direcionadas à transição energética, ao estímulo à expansão de fontes renováveis e à promoção da eficiência nos processos industriais como caminhos estratégicos para a redução das emissões. O Brasil, não obstante tenha registrado progressos significativos nas últimas décadas, particularmente no que se refere à participação de fontes limpas em sua matriz elétrica, ainda enfrenta obstáculos consideráveis para conciliar o crescimento econômico com a efetiva redução das emissões de GEE. Esse desafio torna-se ainda mais premente diante da trajetória de aumento do consumo de energia per capita observada no período estudado, que acompanha o desenvolvimento do país. Cabe ressaltar que diversas das alicerces teóricas e conjecturas aqui discutidas constituem, em certa medida, desdobramentos da fase anterior de investigação conduzida por Stefani et al. (2026), na qual a presente pesquisa se revela de modo complementar ao estudo supra citado.

De forma holística, o presente estudo confirma que tanto o consumo de energia quanto a atividade industrial figuram como determinantes relevantes das emissões de gases de efeito estufa per capita no Brasil. As evidências empíricas aqui apresentadas — que se somam e ampliam os achados de Stefani et al. (2026) — reforçam que políticas voltadas à diversificação da matriz energética, com ampliação da participação de fontes solares, eólicas e biomassa, bem como à adoção de medidas que estimulem ganhos de eficiência energética no setor industrial, constituem instrumentos essenciais para a mitigação das emissões e para a promoção de uma trajetória de desenvolvimento sustentável no país. Dessa forma, esta investigação, ao mesmo tempo em que dialoga com os resultados da etapa precedente, avança ao oferecer

aprofundamento analítico e interpretações complementares que enriquecem o entendimento sobre os determinantes das emissões de GEE no contexto brasileiro.

Referências

- BANCO MUNDIAL. **World Development Report 2023: Migrants, Refugees, and Societies**. Washington, DC: Banco Mundial, 2023. Disponível em: <https://www.worldbank.org/en/publication/wdr2023>. Acesso em: 24 nov. 2025.
- BRASIL. Ministério de Minas e Energia. **Plano Decenal de Expansão de Energia 2032**. Caderno de Demanda de Eletricidade. Superintendência de Estudos Econômicos e Energéticos. EPE – Empresa de Pesquisa Energética, outubro de 2022. Disponível em: Acesso em: 30 de junho de 2023.
- Crippa, M. *et al.* **CO₂ and Greenhouse Gas Emissions**. Our World in Data, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/s43016-021-00225-9>. Acesso em: 14 nov. 2025.
- EPE – EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Balanco Energético Nacional 2023**.
- EPE. Estudos Socioambientais: **Emissões de Gases de Efeito Estufa**. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/areas-de-atuacao/meio-ambiente/emissoes-de-gases-de-efeito-estufa>. Acesso em: 10 nov. 2025.
- Fan, Y.; Liu, L. C.; Wu, G.; Wei, Y. M. **Analysis of Energy Efficiency of China's Industry Sector**. Energy, v. 31, n. 12, p. 2220-2232, 2006.
- FIORINO, D. J. Environmental Governance and Democratic Legitimacy. **Public Administration Review**, v. 66, n. 3, p. 294-304, 2006.
- Geels, F. W. **The multi-level perspective on sustainability transitions**: Responses to seven criticisms. Environmental Innovation and Societal Transitions, v. 1, n. 1, p. 24-40, 2011.
- Goldemberg, J.; Lucon, O. **Energia e meio ambiente no Brasil**. Estudos avançados, v. 21, p. 7-20, 2007.
- Hilber, C. A. L.; Palmer, C. Urban Development and Air Pollution: Evidence from a Global Panel of Cities. **SSRN Electronic Journal**, n. 175, 2014.
- Hvelplund, F. Renewable energy and the need for local energy markets. **Energy Policy**, v. 34, n. 12, p. 1197-1206, 2006.
- IEA-INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **World Energy Outlook 2020**. Paris: IEA 2020.
- IEA-INTERNATIONAL ENERGY AGENCY . **World Energy Outlook 2021**. Paris: IEA, 2021.
- IEA-INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **World Energy Outlook 2023**. Paris: IEA, 2023.
- IPEA. **Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada**. Disponível em: <https://www.ipea.gov.br/>. Acesso em: 10 nov. 2025.
- IPCC. Climate Change 2022: **Impacts, Adaptation and Vulnerability**. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2022.

Jacobson, M. Z.; Delucchi, M. A. Providing all global energy with wind, water, and solar power, Part I: Technologies, energy resources, quantities and areas of infrastructure, and materials. **Energy Policy**, v. 39, n. 3, p. 1154-1169, 2011.

Johnstone, N.; Haščič, I.; Popp, D. Renewable energy policies and technological innovation: Evidence based on patent counts. **Environmental and Resource Economics**, v. 45, n. 1, p. 133-155, 2010.

Kern, F.; Howlett, M. Implementing transition management as policy reforms: A case study of the Dutch energy sector. **Policy Sciences**, v. 42, n. 4, p. 323-343, 2009.

Lemos, M. C.; Agrawal, A. Environmental governance. **Annual Review of Environment and Resources**, v. 31, p. 297-325, 2006.

Lomas, K. J.; *et al.* The impact of retrofitting homes with energy efficiency measures on air quality and energy use: A case study. **Energy and Buildings**, v. 50, p. 170-181, 2012.

Lund, H. Renewable energy strategies for sustainable development. **Energy**, v. 32, n. 6, p. 912-919, 2007.

Meadowcroft, J. Engaging with the politics of sustainability transitions. **Environmental Innovation and Societal Transitions**, v. 1, n. 1, p. 70-75, 2011.

OBSERVATÓRIO DO CLIMA. **Sistema de Estimativas de Emissões de Gases de Efeito Estufa (SEEG)**. Disponível em: <https://seeg.eco.br/>. Acesso em: 10 nov. 2025.

Oliveira, A. P.; *et al.* Compreendendo os determinantes das emissões de gases de efeito estufa: implicações para políticas públicas. **Revista Brasileira de Políticas Ambientais**, v. 17, n. 2, p. 123-145, 2022.

Patterson, M. G. What is energy efficiency? Concepts, indicators and methodological issues. **Energy Policy**, v. 24, n. 5, p. 377-390, 1996.

Raupach, M. R. *et al.* Global and Regional Drivers of Accelerating CO2 Emissions. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 104, n. 24, p. 10288-10293, 2007.

SCIELO BRASIL. **Emissões de gases de efeito estufa e eficiência ambiental no Brasil**. Nova Economia, 2019. Disponível em:

<https://www.scielo.br/j/neco/a/r5yxTNfpKqCtgBNxKwKFCDF/?format=html>. Acesso em: 10 nov. 2025.

SEEG. **Sistema de Estimativas de Emissões de Gases de Efeito Estufa**. Disponível em: <https://seeg.eco.br/>. Acesso em: 10 nov. 2025.

Seto, K. C.; *et al.* Urbanização, emissões de carbono e sustentabilidade global. **Environmental Research Letters**, v. 18, n. 4, p. 045001, 2023.

Sorrell, S.; *et al.* **The economics of energy efficiency**: Barriers to cost-effective investment. Cheltenham: Edward Elgar, 2004.

Sorrell, S. Reducing Energy Demand: A Review of Issues, Challenges and Approaches. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 47, p. 74-82, 2015.

Sovacoo, B. K. The importance of comprehensiveness in renewable electricity and energy-efficiency policy. **Energy Policy**, v. 37, n. 4, p. 1529-1541, 2009.

Sovacool, B. K. How long will it take? Conceptualizing the temporal dynamics of energy transitions. **Energy Research & Social Science**, 13, 202–215, 2016.

Stern, D. I. Modeling International Trends in Energy Efficiency and Carbon Emissions. **Environmental Economics and Policy Studies**, v. 12, n. 1, p. 35-54, 2010.

Stefani, P. F. et al. Determinantes das emissões de gases de efeito estufa no Brasil: uma análise do consumo de energia e da atividade industrial (1990-2023). **Revista DCS**, [S. l.], v. 23, n. 87, p. e4598, 2026. Disponível em:
<https://ojs.revistadcs.com/index.php/revista/article/view/4598>. Acesso em: 4 abr. 2026.

UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME. **Emissions Gap Report 2023**.

Nairobi: United Nations Environment Programme, 2023.

Wang, Q.; Su, M.; Li, R.; Peng, M. The Effects of Urbanization and Industrialization on Decoupling Economic Growth from Carbon Emissions. A Case Study of China. **Sustainability**, v. 11, n. 3, p. 692, 2019.

York, R.; Rosa, E. A.; DIETZ, T. STIRPAT. IPAT and ImPACT: Analytic Tools for Unpacking the Driving Forces of Environmental Impacts. **Ecological Economics**, v. 46, n. 3, p. 351-365, 2003.

Zhang, Y.; Wang, C.; Wang, F.; Su, B. Decomposition of Energy-Related Carbon Emissions in China: An Empirical Analysis Based on Provincial Panel Data. **Journal of Cleaner Production**, v. 142, p. 755-764, 2017.