

EMISSÕES DE CO₂ E O IMPACTO DEMOGRÁFICO GLOBAL: A REGRESSÃO MLR E O CASO ESPECÍFICO DO NORDESTE DO BRASIL.

CO₂ EMISSIONS AND THE GLOBAL DEMOGRAPHIC IMPACT: THE MLR REGRESSION AND THE SPECIFIC CASE OF NORTHEAST BRAZIL.

Gilson da Silva Vasconcelos
Doutorando pela Universidade Federal da Paraíba
g.lsonvasconcelos@gmail.com

Ivan Marinho de Barros
Doutorando pela Universidade Federal da Paraíba
ivanmdebarros@gmail.com

Lucas Lucio Godeiro
Professor da Universidade Federal Rural do Semi-Árido
lucasgodeiro@ufersa.edu.br

GT10 – Trabalho Rural, Reforma Agrária na Contemporaneidade e Migrações

Resumo:

As emissões de CO₂ é um tema amplamente debatido devido aos impactos ambientais, principalmente em relação às mudanças climáticas, urbanização acelerada e crescimento populacional¹. Este trabalho apresenta evidências do impacto da urbanização (migração do campo para a cidade) na poluição, no período de 2013-2023, utilizando Regressão Linear Múltipla via Mínimos Quadrados Ordinários (MQO)². Dados do World Bank sobre emissões de CO₂, população urbana e mundial foram organizados no *RStudio* para análise. A regressão mostrou que tanto o percentual de urbanização, quanto a população total exercem influência significativa e robusta sobre as emissões, com um R² ajustado de 0,8707, sugerindo que o modelo explica aproximadamente 87,1% da variação das emissões de CO₂. Adicionalmente, este estudo inclui uma análise do Nordeste do Brasil como um caso regional que complexifica esses achados globais, onde o impacto da urbanização e do êxodo rural está fortemente ligado à vulnerabilidade socioeconômica e às emissões setoriais ligadas à agropecuária e ao uso da terra. Assim, os resultados globais indicam um efeito robusto da urbanização na poluição, condizente com o aumento da população e a redução da população rural. O estudo evidencia a importância de adotar medidas sustentáveis e regionalmente diferenciadas para mitigar os impactos da poluição, tratando tanto a eficiência urbana quanto as causas do esvaziamento do campo.

Palavras-chave: Emissão de CO₂; Êxodo Rural; Nordeste

Abstract:

CO₂ emissions are a widely debated topic due to their environmental impacts, mainly concerning climate change, accelerated urbanization, and population growth. This study presents evidence on the impact of urbanization (migration from rural to urban areas) on pollution, covering the period 2013–2023, using Multiple Linear Regression (MLR) via Ordinary Least Squares (OLS).

Data on CO₂ emissions, urban population, and total population were obtained from the World Bank and processed in *RStudio* for analysis. The regression results indicate that both the

urbanization rate and total population exert a significant and robust influence on emissions, with an adjusted R^2 of 0.8707, suggesting that the model explains approximately 87.1% of the variation in CO₂ emissions.

Additionally, this study includes an analysis of Northeast Brazil as a regional case that complexifies these global findings, where the impact of urbanization and rural-urban migration is strongly linked to socioeconomic vulnerability and sectoral emissions related to agriculture and land use.

Thus, the global results demonstrate a robust effect of urbanization on pollution, consistent with the increase in population and the decline in rural inhabitants. The study highlights the importance of adopting sustainable and regionally differentiated measures to mitigate pollution impacts, addressing both urban efficiency and the root causes of rural depopulation.

Key words: CO₂ Emissions; Rural-Urban Migration; Northeast

1. INTRODUÇÃO

Quando tratamos da problemática das emissões de dióxido de carbono, da importância do êxodo rural (acelerada urbanização) e do crescimento populacional, trabalhamos sobre um tema plural, e que se insere de maneira criteriosa na Agenda 2030. De maneira a tentar entender em que as situações econômicas são afetadas e que pontos principais estão ligados diretamente à economia e à formação da população dos países e em como isso afeta as emissões de gases de efeito estufa (GEE).

O aumento das emissões de dióxido de carbono está diretamente ligado ao aumento da temperatura do planeta o que segundo Silva (2009) gera uma série de desequilíbrios dentre eles: alterações da pluviosidade, desertificação e degelo nas regiões polares do planeta, impactos na produção agrícola, e na saúde humana. Soares e Lima (2013) nos trazem ainda que esse fato é resultado do crescimento das emissões dos gases causadores do efeito estufa.

Ainda para Silva (2009) as questões ambientais ganharam destaque no rol das preocupações sociais e econômicas, desde os anos 1990. Para Lotz (2018) e Dogan, (2019) a utilização intensiva de combustíveis fósseis, como carvão, petróleo e gás natural, tem sido apontada como um dos principais impulsionadores do aumento das emissões de CO₂.

Com relação a emissão de gases de efeito estufa (GEE) referente aos anos compreendidos entre 2013 e 2023, segundo dados do World Bank, é possível perceber que a Índia ainda muito rural, ocupada a primeira posição desde o ano de 2013 seguida pela China, que passa por um processo migratório forte da população rural para a urbana. No entanto, é importante entender que embora sejam países com maior emissão de CO₂, ainda assim, não são os que possuem a maior taxa de população urbana. O Qatar possui uma concentração de 99% da população vivendo na área urbana, e, mesmo assim, possui uma das menores taxas de emissão de CO₂ seguido da Bélgica que está em 92º no ranking de poluentes. Essa situação se dá, claramente, devido à população total destes países, por isso pretendemos cruzar a migração

da população rural com a população total dos países, de modo a explicar mais rigorosamente como essas variáveis impactam nas emissões de CO₂.

Para Onofrei (2022), com o passar dos anos a concentração de dióxido de carbono na atmosfera só aumenta, e, embora seja fundamental para o crescimento econômico, é necessário que em diferentes estágios surjam soluções para os problemas ambientais. O autor completa que as emissões da indústria humana representam um fator-chave nas mudanças climáticas e apresentam um dos desafios mais urgentes do mundo.

As transformações que ocorrem diretamente no espaço rural, que na maioria das vezes é impulsionada pela modernização agrícola e o grande desenvolvimento das economias globais, o que tem intensificado o êxodo rural ao longo dos anos. Nesse sentido, é importante destacar que a migração da população dos campos para os centros urbanos, pode ocorrer por diversos fatores além do desejo de alterações sociais, econômicas e até mesmo ambientais. A mudança de milhões de pessoas para as cidades desencadeia em um aumento sobre a infraestrutura urbana e altera radicalmente os padrões de consumo e demanda energética, culminando em um aumento expressivo das emissões de gases de efeito estufa (GEE), especialmente o dióxido de carbono (CO₂).

Neste artigo, buscamos evidências empíricas do impacto que tem a poluição entre 2013 e 2023, e o aumento da população rural e urbana (população total), podem interferir na quantidade de CO₂ emitida. E, também, parte da premissa de que o problema das emissões urbanas não pode ser dissociado das condições que levam ao esvaziamento do campo. Assim, dada a importância de discussões pertinentes à redução da emissão de GEE vamos quantificar as consequências ambientais, em termos de emissões de CO₂, geradas pelo processo de migração de pessoas do campo para a cidade e pelo crescimento populacional.

Neste sentido, dada à importância de discussões pertinentes a redução da emissão de gases de efeito estufa, este artigo tem por objetivo analisar o comportamento das emissões de CO₂ entre os anos de 2013-2023 afim de entendermos se quantidade de emissão de CO₂ possuem uma relação direta com a diminuição da população rural e da quantidade populacional total (urbana e rural) dos países.

2. REVISÃO DE LITERATURA

Jabotá (2011) explica que a urbanização, por implicar na alta concentração de pessoas e atividades produtivas sobre um pequeno espaço, gera impactos degradadores do meio ambiente com efeitos sinérgicos e persistentes.

Azam *et al.* (2016) analisam a degradação ambiental pela emissão de CO₂ no perfil de economias selecionadas com maiores emissões de CO₂ e concordam que há uma relação positiva entre emissões de CO₂ e migração da população rural para as cidades na China, Japão e EUA.

Filho (2019) ainda complementa que o impacto da urbanização no meio ambiente, especialmente em regiões metropolitanas e grandes cidades, está fortemente relacionado às populações em situação de vulnerabilidade social. E nos traz que isso ocorre porque essas comunidades, em sua maioria, vivem em condições habitacionais precárias, principalmente em assentamentos informais, tomando como única opção a ida para as cidades. Esse movimento é mais forte em países desenvolvidos, e pode ser relacionado às grandes empresas agropecuárias forçando os trabalhadores rurais a se desfazerem de suas terras e migrarem para o meio urbano.

Ainda é possível perceber que há uma aceitação de forma geral de que existe uma ligação entre uma maior parcela de pessoas que vivem em áreas urbanas e maiores taxas de emissões de CO₂ (UN-Habitat, 2011). De maneira global, a relação entre o nível de urbanização e as emissões de CO₂ per capita é consideravelmente forte e vem aumentando ao longo dos anos¹.

Sethi e Creutzig (2023) concordam que essa relação entre êxodo rural e aumento das emissões de CO₂ é positiva, pois há robustos estudos anteriores² que mostram que o crescimento das áreas urbanas e a discrepância entre população urbana e população rural, para onde tende os países em desenvolvimento e situação em que repousam os desenvolvidos, traz consigo forte incremento nas emissões de GEE.

Geraldino (2023) evidencia que as emissões de muitos poluentes por unidade de produção até diminuem ao longo do tempo nos países desenvolvidos devido aos melhores planejamentos ambientais regulamentadas e inovações técnicas. Diferentemente da Índia, que possui uma população rural de 909 milhões de habitantes³ (quase dois terços da população total) vivendo na zona rural, mas tem sua maior concentração de emissões de GEE no um terço que vive em cidades, dadas as práticas predatórias de produção. Poumanyong e Kaneko (2010) e

¹ Statista. Último acesso em 19/12/2024.

² Ver Seto, Güneralp e Hutyra (2012), em Global Forecasts of Urban Expansion to 2030 and Direct Impacts on Biodiversity and Carbon Pools; Kennedy et al. (2009) em Greenhouse Gas Emissions from Global Cities; e Newman e Kenworthy (1999).

³ Fonte: Macrotrends. Visitado em 22/03/2025.

Wang, Zhao e Zhang (2016) ajudam a entender de que maneira o crescimento populacional influencia no aumento da emissão de CO₂.

Pode-se citar o estudo de Camara *et al.* (2020) que ao analisar o comportamento das emissões de CO₂ no ano de 2014, respondem à problemática de quais são as variáveis relacionadas ao desenvolvimento das economias globais que influenciam nas emissões de CO₂ e como resultado notam que as variáveis de produção industrial, produção de energia e crescimento populacional explicam, em conjunto, 78% das variações das emissões de CO₂, onde para cada variação de 10% nessas variáveis houve um acréscimo de 5,3%, 2,5% e 8,8%, respectivamente, nas variações das emissões globais de CO₂.

Geraldino (2023) analisa o impacto do desenvolvimento econômico na poluição, em uma perspectiva de longo prazo, de 1961 a 2014 e chega à conclusão que uma vez que a população mundial e a concentração urbana aumentaram no século XX, essa concentração humana em uma sociedade baseada em carbono teve um forte impacto no meio ambiente e que apenas a população urbana possui um efeito positivo e robusto sobre a poluição, isentando de grande parte da culpa a população rural.

Tomando como base as variáveis que vamos usar no nosso MLR, temos que a população mundial alcançou em 2013 6,9 bilhões de habitantes, e em 2023 chegou a 8 bilhões⁴. Ao passo em que a população mundial que residia na área urbana em 2013 era de 51,5%, e em 2023 chegou a 57,3%. Segundo Filho (2019), as estimativas disponibilizadas pela Organização das Nações Unidas (ONU) para o ano de 2050 apontam ainda para um percentual de urbanização de 68,3%, contra 31,7% de população rural. Em suma, a população rural irá de 48,5% em 2013 para um futuro de 31,7% em 2050.

2.1 O Caso Brasileiro

Segundo Abramovay, Camarano e Pinto (1997) um a cada três brasileiros que vivem na área rural escolhem a emigração e ainda observaram que se as taxas de evasão do meio rural para que foram analisadas entre 1991 e 1995, continuassem de forma crescente, cerca de 30% dos brasileiros que moravam no campo, teriam mudado seu local de residência.

Tendo com base dados históricos para o caso brasileiro, percebe-se que há uma maior concentração de população brasileira em áreas urbanas e exclusivamente em grandes cidades. Por volta de 1996, cerca de 78% dos brasileiros residiam em áreas urbanas. Ainda, a partir de

⁴ Fonte: Worldometer. Acesso em 22/03/2025.

IPECE (2021), nos países desenvolvidos, ao menos ¼ da população mora no ambiente rural e o que é interessante apontar no caso do Brasil, é que o que torna interessante o estudo demográfico do meio rural brasileiro a diferenciação regional quanto aos ritmos dos movimentos migratórios ao longo do tempo.

Ainda segundo Almeida (2018) na metade do século XX era possível perceber que o processo de urbanização estava definitivamente caracterizado pelo abandono das residências do campo, para a procura de emprego nas cidades.

O Brasil vem sendo de grande importância para a discussão que trata da redução de Gases do Efeito Estufa (GEEs), como o Dióxido de Carbono (CO_2). Pensando nisso, segundo a UNEP (2024) os diversos pesquisadores de vários lugares do mundo vêm mostrando que as ameaças ambientais são causada pela ação antrópica intensificada pelo modelo de produção e consumo.

Ainda, segundo Santos et. al (2009) pôr o Brasil ser um país de proporções continentais, cada região possui aspectos fisiográficos particulares, com características únicas e com grandes diferenças físicas, sociais, culturais, culturais, populacionais e políticas.

2.1 A Dinâmica Regional: O Caso do Nordeste Brasileiro

Inicialmente, podemos destacar que no Brasil, os movimentos migratórios envolvem, em sua maioria pessoas de baixa renda, que perdem vagas de trabalho nos seus estados de origem e vivem no limite da sobrevivência em outros lugares Sobrinho (1982). Ainda, segundo Santos et. al (2009), o processo de mudança de pessoas do ambiente rural para o ambiente urbano, pode se dar por diversos fatores, devido à natureza voluntária ou não. No mais, como mencionado, essa relação de migração campo-cidade do Nordeste, tem mais impacto populacional e socioeconômica em comparação com o cenário nacional.

É um fato que a causa do êxodo rural não é apenas um resultado da modernização agrícola, como também uma consequência da implantação de um modelo econômico moderno da produção agropecuário (Vanderline, 2005).

Assim, levando em consideração a variável população Urbana (β_1) do modelo econométrico deste trabalho, embora englobe questões associadas ao desenvolvimento, para o Nordeste, pode assumir questões de vulnerabilidade social.

2.2 Emissões de CO_2 o Paradoxo Regional

Globalmente, os setores de Energia e Processos Industriais são os maiores emissores de nas cidades desenvolvidas. No Brasil, e em particular no Nordeste, os estudos do SEEG (Sistema de Estimativas de Emissões de Gases de Efeito Estufa) e de Mata (2015), IPECE(2021) mencionam que a mudança de uso da terra e a Agropecuária continuam sendo setores de grande relevância nas emissões brutas.

Alguns estudos regionais, como a análise da agricultura nos estados nordestinos, como Frederico (2023) indicam que a contribuição média da agricultura do Nordeste para o total brasileiro é menor do que em outras regiões, porém, destacam Bahia e o Maranhão como estados com maiores emissões de CO₂ no setor agrícola, refletindo a expansão de fronteiras agrícolas.

Ainda é possível estabelecer uma conexão direta entre o avanço da desertificação no Semiárido e a necessidade premente de estudar e desenhar estratégias de adaptação e mitigação das mudanças climáticas nessa região Santos et al. (2009) e Ab'Saber (2003).

Assim, a análise regional é de extrema importância para entender que a variável dependente do modelo ($Y = \text{Emissão de CO}_2$) no Nordeste está sujeita não apenas à demanda energética da população urbana (B1), mas também à pressão exercida sobre os biomas locais (Caatinga, Cerrado) decorrente da ausência de desenvolvimento rural sustentável, que é, ironicamente, a causa do êxodo.

3. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Para o desenvolvimento da pesquisa utilizou-se um conjunto de dados disponibilizados pelo World Bank, Statista e Worldometer. Os dados são anuais e por países, com informações disponíveis de 2013-2023 – especificamente para trabalharmos com o recorte de uma década, e com dados consolidados de 2023, uma vez que muitos dados de 2024 ainda passarão por revisão. Assim, para a manipulação dos dados dos modelos econométricos, foi utilizada a Regressão Linear Múltipla (RLM), que julgamos ser o modelo mais adequado, para entendermos de que maneira se comporta as emissões globais de CO₂ nos anos de 2013-2023 com relação a população rural, urbana e a população total dos países. No modelo de regressão linear múltipla, assume-se que existe uma relação linear entre a variável Y (a variável dependente) e k variáveis independentes (Ferrão, 2001) e Santana (2003) complementam que a variável dependente (Y) é explicada pelo conjunto das variáveis independentes ($X_i, i = 1, 2, \dots, n$), e a parcela não explicada dessas variações é representada pelo termo de erro aleatório (ϵ).

Assim, o modelo geral de regressão linear múltipla, com as variáveis explicativas é apresentado em (1)

$$Y_t = \beta_0 + \beta_{pop\ total} X_{1t} + \beta_{(1-pop\ rural)} X_{2t} + \varepsilon_t \quad (1)$$

Onde:

Y_t = variável dependente;

X_{1t}, \dots, X_{nt} = são as variáveis independentes ou explicativas;

ε_t = termo de erro aleatório;

$\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_n$ = são os coeficientes parciais ou parâmetros de regressão múltipla a serem estimados, em que β_0 é o intercepto e os demais β_j ($j = 1, 2, \dots, n$) são as inclinações (Santana, 2003; Hoffmann, 2016). Assim, resumimos no Quadro 1 como o trabalho se desenvolverá:

Quadro 1 - Estimação e descrição do modelo econométrico estimado

4. Resultados e discussão

Variáveis	Descrição das Variáveis
Emissões CO ²	Em toneladas totais de todos os países de 2013-2023
β_0	Coeficiente Linear
β_1	Trata-se do valor da população total (urbana e rural) total dos países de 2013-2023
β_2	Trata-se do valor da população urbana total dos países de 2013-2023
ε_i	Parcela não explicada pelas variações – Erro da regressão.

Como mostra o quadro 1, as informações tratam dos anos de 2013-2023. Os dados foram disponibilizados pelo *World Bank*, com um total de 266 observações.

Para melhor ilustrarmos, será mostrado, abaixo, o gráfico de dispersão entre a variável da População Urbana (β_1) (no eixo horizontal) e a variável dependente *Emissões CO₂_t*.

Gráfico 1 – Dispersão de População Urbana (β_1) versus Emissões CO_2_t

Fonte: elaboração do autor (2024)

Assim, para entendermos:

1. Eixo horizontal trata da População Urbana (β_1)
2. Eixo Vertical é a Emissões CO_2_t em toneladas.

Os pontos destacados, em cor azul, no gráfico nos mostram a dispersão dos dados que foram observados com relação a População Urbana (β_1) e as Emissões CO_2_t .

Agora, que mostramos como foi a dispersão dos dados de População Urbana (β_1) versus as emissões de CO_2 , vamos mostrar a dispersão da População Total (β_2) versus as Emissões CO_2_t .

Os pontos indicam que, conforme β_1 aumenta, as emissões de CO_2 também tendem a aumentar, até mesmo nas partes mais altas de β_1 . Isso confirma a relação positiva encontrada no modelo de regressão (coeficiente de $\beta_1=0,00708$).

Observa-se maior concentração de pontos próximos ao eixo horizontal, sugerindo que a maioria dos dados está associada a populações urbanas mais baixas. No entanto, há alguns pontos dispersos para valores mais altos de emissão de CO_2 , indicando variação nas emissões de CO_2 , mesmo para valores similares de β_1 .

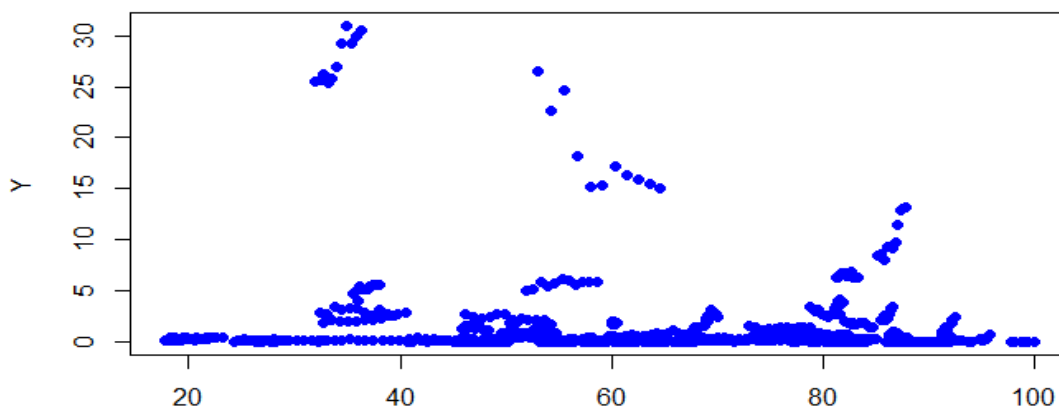
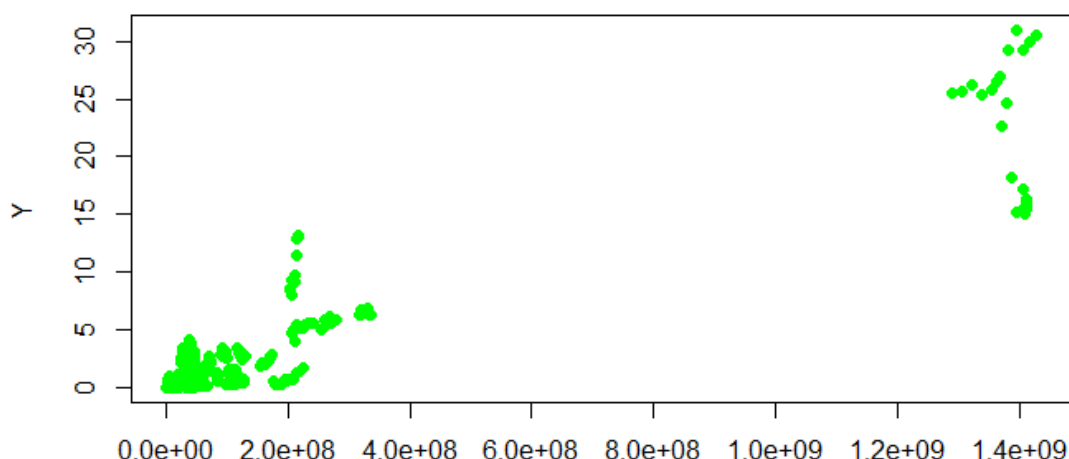


Gráfico 2 – Dispersão de População Total (β_2) vs Emissões CO_2_t



Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

Assim,

1. Eixo horizontal trata da População Total (β_2)
2. Eixo Vertical é a Emissões CO_2_t em toneladas.

Os pontos, em cor verde, mostram a dispersão dos dados observados, que nos dizem que a relação entre População Total (β_2) e as Emissões CO_2_t .

A maneira em que se encontra a dispersão dos pontos, indica uma relação positiva e consistente entre a população total β_2 e as emissões de CO_2 . Isso implica dizer que o resultado do coeficiente altamente significativo de β_2 ($1,699 \times 10^{-8}$, com $p < 2,2 \times 10^{-16}$). Outro ponto importante que é possível destacar no gráfico 2 é o fato de que os pontos que estão mais concentrados têm uma tendência linear que pode ser percebida facilmente, diferente da variável β_1 , que está diretamente associado ao fato de que β_2 tem um impacto direto e mais previsível nas emissões de CO_2 .

Devido à grande quantidade de amostras para análise foi aplicado um modelo de regressão linear múltipla de corte transversal, envolvendo a quantidade de emissão de CO_2 anual (milhões de toneladas), quantidade populacional total (anual) e população urbana total (anual), a fim de verificar há causalidade entre as variáveis supramencionadas, e se elas influenciaram positivamente ou inversamente às oscilações do aumento na emissão de CO_2 .

O quadro 2 apresenta o comportamento da Emissão de CO₂ (variável dependente) diante das demais variáveis (variáveis explicativas) para os dados estimados e observados, como também os seus desvios de ajustamento.

Assim, após a estimação do modelo apresentaram-se os seguintes resultados:

Quadro 2 – Modelo Estimado da Emissão de CO₂

Variável	Coefficiente	Erro Padrão	t-valor	p-valor
Intercepto (β_0)	-0,2747	0,1488	-1,847	0,0651
População Urbana (β_1)	0,00708	0,00217	3,266	0,00113
População Total (β_2)	$1,699 \times 10^{-8}$	$2,103 \times 10^{-10}$	80,793	$2,2 \times 10^{-16}$

Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

Para os valores referente a população urbana β_1 com o valor de 0,00708 no diz que um aumento de 1 milhão de pessoas que passam a viver nas áreas urbanas está diretamente associada a um aumento de 7 mil toneladas de emissão CO₂. Ainda é possível entender que o p-valor no valor 0,00113 nos diz que há uma relação significativa ao nível de 1%, o nos diz que a hipótese de que a urbanização contribui para o aumento de CO₂.

Para o β_2 que está relacionado a populacional total (urbana e rural), que teve um coeficiente de $1,699 \times 10^{-8}$, o que é um valor bem baixo, acaba por sugerir que para cada individuo a mais na população total há um aumento excessivamente pequeno nas emissões de CO₂. Já o valor alto do t-valor 80,793 e o p-valor muito baixo 2×10^{-16} indicam que a variável tem uma relação estatisticamente significativa com as emissões de CO₂. Apesar do efeito individual pequeno, a população total como um todo tem um impacto relevante nas emissões globais.

Quadro 3 – Estatística de Regressão da Emissão de CO₂

Estatística de regressão	Valor
Erro Residual	1,352
R múltiplo	0,871
R ajustado	0,8707
Estatística F	3308 ($p < 2,2 \times 10^{-16}$)

Observações	226
-------------	-----

Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

Podemos perceber que com o quadro 3, o R ajustado por graus de liberdade, na ordem de 0,8707 mostra que 87% das mudanças que acontecem na variável dependente, que é a emissão de CO₂, durante o período analisado, podem ser explicadas pelas variáveis independentes do modelo de regressão e que os 13% que restam podem ser explicados por outros fatores. Os resultados incluem as estimativas dos parâmetros e suas respectivas estatística t entre parênteses.

$$Emissões\ CO_{2t} = -0,2747 + 0,00708(População\ Urbana)_{1t} + 1,699 \times 10^{-8} (População\ Total)_{2t} \quad (3)$$

Os sinais dos coeficientes da regressão linear múltipla nos dão informações importantes do significado das variações ao longo dos anos com relação à emissão de CO₂ pelos países, o que indica que qualquer alteração populacional gera um aumento na quantidade de emissão do CO₂ no período entre 2013 e 2023.

Quadro 4 – Resíduos de Regressão da Emissão de CO₂

Estatística	Valor
Mínimo	-9.0883
1° Quartil (Q1)	-0.3949
Mediana	-0.1590
3° Quartil (Q3)	0.1111
Máximo	9.2051
Erro Padrão dos Resíduos	1.352

Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

Quanto ao quadro 4, trata de uma análise dos resíduos que é bastante útil para verificarmos a suposição de que os erros são não correlacionados e tem uma distribuição que é quase que normalmente com média zero.

Para Chein (2019) o erro padrão de uma regressão é um estimador do desvio padrão dos erros da regressão. Stock e Watson (2010), ainda complementam que os erros padrão são uma

medida de dispersão das observações ao redor da linha de regressão, adotando a mesma medida da variável dependente.

Assim, os resíduos representam uma distribuição com mínimo de -9.0883 e máximo de 9.2051, indicando uma variação considerável entre os dados reais e as previsões do modelo. Já a mediana no valor de -0.1590 sugere que a maioria dos erros do modelo está equilibrada em torno da linha de regressão. Ainda, é possível verificar que os valores do 1º e 3º quartil no diz que 50% dos resíduos estão alocados em um intervalo estreito, o que justifica o bom uso do modelo com relação aos dados.

4.1. Análise Regional: O Paradoxo Setorial do Nordeste Brasileiro

Embora o modelo de Regressão Linear Múltipla demonstre um efeito positivo e estatisticamente significativo da População Urbana ($\beta_1 = 0,00708$) e da População Total (β_2) sobre as emissões de CO_2 em escala global, a análise regional do Nordeste Brasileiro complexifica essa interpretação

O coeficiente β_1 implica que o aumento na população urbana está associado a um acréscimo de 7 mil toneladas de CO_2 . Contudo, no contexto nordestino, essa urbanização acelerada é, em grande parte, impulsionada por vulnerabilidade socioeconômica e pela perda de condições de subsistência no campo. Isso sugere que a migração rural (β_1) não impacta o CO_2 apenas pela demanda urbana típica de países desenvolvidos (serviços e indústria), mas também pela origem setorial da emissão.

O paradoxo regional reside no fato de que as fontes primárias da variável dependente ($Y = \text{Emissões de } CO_2$) no Nordeste ainda possuem uma forte ligação com o meio rural, mesmo com a população migrando para as cidades. Ainda, estudos regionais indicam que a mudança de uso da terra e a agropecuária continuam sendo setores de grande relevância nas emissões brutas da região. Trabalhos como o de Mata (2015) focam especificamente nas emissões associadas às mudanças no uso da terra no Bioma Caatinga.

A literatura, incluindo Ab'Sáber (2003) e Santos et al. (2009), reforça a fragilidade do Semiárido à desertificação, estabelecendo uma conexão direta entre o risco ambiental do bioma e a pressão sobre as pessoas. A variável Y no Nordeste, portanto, está ligada à pressão exercida sobre os biomas locais (Caatinga, Cerrado) decorrente da ausência de desenvolvimento rural sustentável, que é uma das causas do êxodo.

5. CONCLUSÕES

A partir dos resultados empíricos obtidos neste estudo, evidencia-se de forma consistente que a população total constitui um preditor robusto das emissões de CO₂, demonstrado pela forte aderência dos pontos à linha de regressão e pelo alto valor do R² ajustado (0,8707). Esse indicador sugere que aproximadamente 87,1% da variação nas emissões pode ser explicada pelas variáveis analisadas, corroborando a importância da dimensão populacional para o fenômeno estudado.

A análise detalhada dos coeficientes revelou que, embora tanto o percentual de urbanização quanto a população total tenham influência estatisticamente significativa sobre as emissões, a contribuição da população total apresenta um impacto mais direto e expressivo. Os gráficos de dispersão reforçam essa constatação, ao mostrar que os países com maiores populações urbanas e totais concentram as emissões mais elevadas de CO₂. Essa tendência se deve, em parte, ao fato de que altas densidades populacionais e a concentração em grandes centros urbanos implicam maiores demandas energéticas e, conseqüentemente, maiores emissões.

Adicionalmente, a análise dos resíduos do modelo confirma a adequação do ajuste, demonstrando uma distribuição equilibrada em torno da linha de regressão e reforçando a validade dos parâmetros estimados. Essa robustez empírica evidencia que, mesmo que o efeito individual de cada incremento populacional pareça pequeno, o acúmulo desses efeitos gera uma contribuição significativa para as emissões globais.

Outro aspecto de relevância destacado por este estudo é o impacto do êxodo rural — entendido como a migração da população de áreas rurais para centros urbanos — no aumento das emissões de CO₂. Essa transição não apenas altera a configuração demográfica das regiões, mas também intensifica a pressão sobre a infraestrutura urbana, aumentando a demanda por transporte, habitação, energia e serviços, todos fortemente associados à elevação dos níveis de emissão. O êxodo rural, portanto, emerge como uma variável crítica a ser considerada na formulação de políticas públicas voltadas à sustentabilidade ambiental.

Em termos práticos, os resultados apontam para a necessidade de que políticas públicas sejam formuladas com foco na implementação de medidas sustentáveis, de modo a mitigar os impactos ambientais sem comprometer o desenvolvimento econômico. A integração de estratégias que promovam a eficiência energética, o planejamento urbano sustentável e a diversificação das fontes de energia é crucial para desacelerar o aumento das emissões de CO₂.

O modelo utilizado neste estudo se mostra altamente viável para a análise das variáveis relacionadas às emissões, e sua aplicação pode ser estendida a outros setores, como indústria, transportes e geração de energia, os quais também desempenham papéis importantes no contexto ambiental. Assim, a abordagem empírica adotada não só confirma a relação positiva entre a urbanização, o crescimento populacional e as emissões de CO₂, mas também abre caminhos para futuras investigações que integrem outros determinantes do impacto ambiental.

Em síntese, os achados deste trabalho demonstram que a migração da população rural para as cidades, associada ao crescimento da população total, exerce um efeito robusto e direto no aumento das emissões de CO₂. Essa evidência empírica reforça a urgência de adotar medidas estratégicas e sustentáveis para enfrentar os desafios ambientais impostos pela urbanização acelerada, pelo êxodo rural e pelo crescimento populacional global.

É fundamental ressaltar que o presente estudo, dada a sua fase inicial e o caráter exploratório dos resultados globais, encontra-se andamento. A análise de Regressão Linear Múltipla apresentada estabeleceu o fundamento empírico da influência da urbanização e do crescimento populacional sobre as emissões de CO₂ em nível mundial, com alta robustez estatística. Contudo, a complexidade revelada pela discussão do caso Nordestino indica a necessidade de um aprofundamento regional.

Para dar uma maior robustez ao trabalho, pretende-se estimar uma regressão em nível subnacional, utilizando os dados de emissão de CO₂ e as variáveis demográficas específicas para o Nordeste. O objetivo será comparar os coeficientes de regressão do Nordeste com os de outras grandes regiões brasileiras (como o Sudeste e o Sul). Esta análise comparativa regional permitirá validar ou complexificar as conclusões globais, avaliando se os determinantes setoriais e socioeconômicos do CO₂ no Nordeste, pois geram um impacto significativamente diferente. Essa robustez adicional é essencial para fornecer evidências mais precisas para a formulação de políticas públicas de mitigação climática no contexto federativo brasileiro.

Por fim, embora o modelo econométrico global prove a forte relação entre variáveis demográficas e emissões, o estudo do Nordeste do Brasil sugere que a eficácia das políticas ambientais reside na diferenciação regional. Na região, a estratégia de mitigação pode ser focar na eficiência urbana para atender à crescente população ou até mesmo investir em desenvolvimento rural sustentável e no combate à desertificação, a fim de tratar a causa do êxodo e as emissões setoriais ligadas à mudança do uso da terra. Essa abordagem integrada é a

única que pode garantir a sustentabilidade diante da complexa dinâmica demográfica e socioeconômica brasileira.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABREU, S. R. T. de, & Melo de Sousa, A. (2020). ANÁLISE FONOSTILÍSTICA DE AH! e DODÓI. *DESAFIOS - Revista Interdisciplinar Da Universidade Federal Do Tocantins*, 7(3), 106–123.

AB'SÁBER, Aziz Nacib. *Os domínios de natureza no Brasil: potencialidades paisagísticas*. São Paulo: Ateliê Editorial, 2003. 159 p.

Azam, A., Rafiq, M., Shafique, M., Zhang, H., and Yuan, J. (2021). Analyzing the Effect of Natural Gas, Nuclear Energy and Renewable Energy on GDP and Carbon Emissions: A Multi-Variate Panel Data Analysis. *Energy* 219, 119592. doi:10.1016/j. energy.2020.119592

Bueno Camara, S., Pizzi Martins, S., Luiz Costa, N., & Vasconcelos de Oliveira, S. (2020). ANÁLISE DAS EMISSÕES GLOBAIS DE CO₂ A PARTIR DA REGRESSÃO LINEAR MÚLTIPLA. *DESAFIOS - Revista Interdisciplinar Da Universidade Federal Do Tocantins*, 7(3), 198–208. <https://doi.org/10.20873/uftv7-10049>

CAMARANO, Ana Amélia; ABRAMOVAY, Ricardo. *O campo e a cidade: um retrato dos anos 90*. Brasília: IPEA, 1998. (Texto para Discussão, n. 574).

CHEIN, Flávia. Introdução aos modelos de regressão linear: um passo inicial para compreensão da econometria como uma ferramenta de avaliação de políticas públicas / Flávia Chein. -- Brasília: Enap, 2019.

COSTA, N.L.; SANTANA, A.C. de; MATTOS, C. A.C. Análise dos determinantes da produção agropecuária do Rio Grande do Sul. *Ensaio FEE*, v. 36, n. 1, p. 159-178, 2014.

DO NASCIMENTO, Carlos Alberto Sarmento et al. A migração do campo para os centros urbanos no Brasil: da desterritorialização no meio rural ao caos nas grandes cidades. *Brazilian Journal of Development*, v. 4, n. 5, p. 2254-2272, 2018.

DOGAN, Eyup; TASPINAR, Nigar; GOKMENOGLU, Korhan K. Determinants of ecological footprint in MINT countries. *Energy & Environment*, v. 30, n. 6, p. 1065- 1086, 2019.

FERRÃO. Maria Eugênia. Introdução à Modelagem Multinível em Avaliação Educacional. Ministério do Planejamento, Orçamento e Gestão. Rio de Janeiro, 2001.

Filho, H. B., & Engler, H. B. R. (2019). URBANIZAÇÃO, ATIVIDADE PRODUTIVA E MEIO AMBIENTE: UM ESTUDO SOBRE A CIDADE PAULISTA DE FRANCA. *Revista Sergipana De Educação Ambiental*, 6(1), 69 a 78.

FREDERICO, Andre dos Santos. Análise do comportamento de CO₂ na agricultura nos estados Nordestinos. 2023. 35 f. Monografia (Graduação em Agronomia) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2023.

GERALDINO, Gilson. Textos de Economia, Florianópolis, v. 26, n. 1, p. 01-16. Universidade Federal de Santa Catarina. ISSN 2175-8085. jan/jun, 2023

GUJARATI, D. N.; PORTER, D. C. Econometria básica. 5. ed. Porto Alegre: AMGH, 2011. 924 p.

HOFFMANN, R. Análise de regressão: uma introdução à econometria [recurso eletrônico]. 5. Ed. Piracicaba: O Autor, 2016. 393 p.

HOFFMANN, R. Análise de regressão: uma introdução à econometria [recurso eletrônico]. 5. Ed. Piracicaba: O Autor, 2016. 393 p.

IPECE (INSTITUTO DE PESQUISA E ESTRATÉGIA ECONÔMICA DO CEARÁ). *Boletim sobre a Emissão de Gases do Efeito Estufa no Estado do Ceará 2020*. Fortaleza: IPECE, 2021. Disponível em: [https://www.ipece.ce.gov.br/wp-content/uploads/sites/45/2021/11/Boletim_Emissao_Gases_Efeito_Estufa_2020.pdf]. Acesso em: [15/10/2025].

JATOBÁ, Sergio Ulisses Silva. Urbanização, Meio Ambiente e Vulnerabilidade Social. In: IPEA. Boletim regional, urbano e ambiental. n.5, Jun 2011.

KENNEDY, C. et al. Greenhouse gas emissions from global cities. *Environmental Science & Technology*, v. 43, n. 19, p. 7297-7302, 2009.

LISBÔA, Educélio Gaspar. SIQUEIRA, Ionara Santos. CORRADI, AnaLaura. FERNANDES, Douglas. LISBÔA, Érico Gaspar. BELLO, Leonardo Augusto Lobato Braz. J. of Develop. Curitiba, v.6, n.9, p.65308-65321, sep.2020.

LOTZ, T., NISSEN, C., & GODOY, R. Carbon Dioxide Emissions, Consumption, and Economic Growth in Brazil, China, India, and the United States. *Energy Sources, Part B: Economics, Planning, and Policy*. 2018.

MATA, Maria das Vitórias Medeiros da. Estimativa das emissões de dióxido de carbono associadas às mudanças no uso e cobertura da terra do bioma caatinga no Estado do Rio Grande do Norte. 2015. 98f. Tese (Doutorado em Ciências Climáticas) - Centro de Ciências Exatas e da Terra, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2015.

NEWMAN, P.; KENWORTHY, J. *The End of Automobile Dependence: How Cities are Moving Beyond Car-Based Planning*. Washington, DC: Island Press, 1999.

Onofrei M, Vatamanu AF and Cigu E (2022) The Relationship Between Economic Growth and CO₂ Emissions in EU Countries: A Cointegration Analysis. *Front. Environ. Sci.* 10:934885. doi: 10.3389/fenvs.2022.934885

POUMANYVONG, V.; KANEKO, S. Does urbanization lead to less energy use and lower CO₂ emissions? A cross-country analysis. *Ecological Economics*, v. 70, n. 2, p. 434-444, 2010.

SANTANA, A. C. de. Métodos quantitativos em economia: elementos e aplicações. Belém: UFRA, 2003.

SANTOS, Milton. A urbanização brasileira. 5. ed. São Paulo: Editora da USP, 2009. (Ou 5ª ed., 2ª reimpressão).

Sethi, M., & Creutzig, F. (2023). Leaders or laggards in climate action? Assessing GHG trends and References 337 mitigation targets of global megacities. *PLOS Climate*, 2(1), e0000113. <https://doi.org/10.1371/journal.pclm.0000113>

SETÔ, K. C.; GÜNERALP, B.; HUTYRA, L. R. Global forecasts of urban expansion to 2030 and direct impacts on biodiversity and carbon pools. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, v. 109, n. 40, p. 16083-16088, 2012.

SILVA, Marcos Paulo Novais. *Projeção De Emissão De CO₂ No Brasil, Para O Período 2006 a 2015: Uma Análise Com Base Na Integração De Modelos Macroeconômico E Insumo-produto*. 2009.

SOARES, T.C.; LIMA, J.E. de. Uma análise entre a energia, renda e emissões de CO₂: evidências para o Brasil, 1962-2007. *Textos de Economia*. Florianópolis, v.16, n.1, p.11-35, 2013.

SOBRINHO, Thomaz Pompeu. *História das secas (Século XX)*. Coleção Mossoroense. Mossoró, 1982.

STOCK, J. H.; Watson, M. W. *Introduction to Econometrics*. 3. ed. Addison-Wesley Series in Economics, v. 1. Addison-Wesley, 2010.

UNEP. United Nations Environment Programme. *Global Resources Outlook 2024: bend the trend: pathways to a liveable planet as resource use spikes*. Nairobi: International Resource Panel, 2024.

UN-Habitat. (2011). *Global report on human settlements 2011: Cities and climate change policy directions*. <https://unhabitat.org/global-report-on-human-settlements-2011-cities-and-climate-change>

VANDERLINDE, T. (2005). CAPA: O JEITO LUTERANO DE ATUAR COM OS PEQUENOS AGRICULTORES NO SUL DO BRASIL. *RAEGA - O Espaço Geográfico Em Análise*, 10. <https://doi.org/10.5380/raega.v10i0.4986>

WANG, Y.; ZHAO, Y.; ZHANG, Z. How does urbanization affect carbon emissions? A cross-country panel data analysis. *Energy Policy*, v. 98, p. 135-143, 2016.

WOOLDRIDGE, JEFFREY M. *Introdução à econometria: uma abordagem moderna*. 3. ed. São Paulo: Cengage, 2017.