



Universidade Federal do Pampa

**CURSO DE CIÊNCIAS ECONÔMICAS
CAMPUS SANT'ANA DO LIVRAMENTO**

CAROLINA LUIZA FREIRE DE SOUZA

**CRESCIMENTO ECONÔMICO E CO₂: UMA ANÁLISE DA CURVA DE
KUZNETS AMBIENTAL NO BRASIL NO PERÍODO DE 1997-2022**

**SANT'ANA DO LIVRAMENTO
2025**

CAROLINA LUIZA FREIRE DE SOUZA

**CRESCIMENTO ECONÔMICO E CO₂: UMA ANÁLISE DA CURVA DE
KUZNETS AMBIENTAL NO BRASIL NO PERÍODO DE 1997-2022**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao
Curso de Ciências Econômicas, Campus Sant'Ana
do Livramento, da Universidade Federal do Pampa,
como requisito para obtenção do grau de bacharel
em Ciências Econômicas, sob orientação da Prof^a.
Dr^a. Samanda Silva da Rosa.

Sant'Ana do Livramento
2025

Ficha catalográfica elaborada automaticamente com os dados fornecidos
pelo(a) autor(a) através do Módulo de Biblioteca do
Sistema GURI (Gestão Unificada de Recursos Institucionais) .

S5729c Souza, Carolina Luiza Freire de

Crescimento econômico e CO2: uma análise da curva de Kuznets ambiental no Brasil
no período de 1997-2022 / Carolina Luiza Freire de Souza.

44 p.

Trabalho de Conclusão de Curso(Graduação)-- Universidade Federal do Pampa, CIÊNCIAS
ECONÔMICAS, 2025.

"Orientação: Samanda Silva da Rosa".

1. Curva de Kuznets Ambiental. 2. Emissões de CO2 no Brasil. 3. Crescimento
Econômico. 4. Poluição. I. Título.

CAROLINA LUIZA FREIRE DE SOUZA

CRESCIMENTO ECONÔMICO E CO₂:

**UMA ANÁLISE DA CURVA DE KUZNETS AMBIENTAL NO BRASIL NO PERÍODO DE 1997 -
2022**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao curso de ciências
econômicas da Universidade
Federal do Pampa, como requisito
parcial para obtenção do Título de
Bacharel e Ciências Econômicas.

Monografia defendida e aprovada em: 03 de dezembro de 2025.

Banca examinadora:

Prof. Dr^a. Samanda Silva da
Rosa Orientador
(Unipampa)

Prof. Dr^a. Debora Nayar Hoff
(Unipampa)

Prof. Me. Mitali Daian Alves Maciel
(Unipampa)



Assinado eletronicamente por **SAMANDA SILVA DA ROSA , PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 11/12/2025, às 09:00, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **MITALI DAIAN ALVES MACIEL , PROFESSOR MAGISTERIO SUPERIOR - SUBSTITUTO**, em 11/12/2025, às 10:18, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **DEBORA NAYAR HOFF, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 12/12/2025, às 07:25, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.unipampa.edu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **1924579** e o código CRC **01C9A6B3**.

Às minhas avós Marias.

AGRADECIMENTOS

Com lágrimas nos olhos e lembranças no coração posso, enfim, anunciar o início do fim dessa jornada. Foram anos intensos, onde as noites pareciam longas e os dias curtos. À 1466km de casa tive meu primeiro emprego e um vislumbre da independência, mas também atravessei uma pandemia, vivenciei crises de saúde mental, não pude estar presente na despedida dos meus avós paternos, me desorganizei e passei por períodos de austeridade financeira.

Graças a todos que me acompanharam, as experiências ruins não passaram de episódios, e os bons momentos se sobrepuseram às dificuldades. E as dificuldades se tornaram aprendizado. Somente com o coração leve se pode ir adiante.

Mãe, pai, vó, Ro, Lady, tia Lu, tio Rico, tio Beto, tia Pati. Obrigada por tudo. A ordem das palavras é linear por necessidade; a ordem do afeto, porém, é infinita e simultânea. Não existem hierarquias no meu coração quando se trata de vocês, e não existem palavras capazes de expressar o quanto vocês são importantes para mim. Aos meus tios, nunca vou esquecer do suporte quando eu mais precisei. E ao meu pai por nunca ter deixado de me ajudar, durante todo esse tempo. Igualmente, à minha avó, que diversas vezes foi surpreendida com imprevistos. À minha mãe e meu padrasto, que faziam eu me sentir amada em cada visita. Essa conquista é de todos vocês.

À todas as pessoas que conheci aqui, onde cheguei sem conhecer ninguém, meu sincero agradecimento. Obrigada por permitirem que nossos caminhos ultrapassassem a superfície das primeiras conversas e por me acolherem em suas casas e em suas histórias. Rogério, Mauro, Manu, Rafa, Vitória, Thierry. Cada uma de vocês iluminou o caminho e tornou os dias mais gentis.

Ao meu companheiro de dias, de trabalho, de lazer e de sonhos, deixo minha gratidão mais tenra. Obrigada pela dádiva da sua presença, que dilui todas as dúvidas e inseguranças, mesmo nos dias cansativos. Pelos seus gestos de carinho e cuidado.

Obrigada a todo o Corpo Docente do Curso de Ciências Econômicas da Unipampa, sempre acessíveis e dispostos. À minha orientadora Samanda, um agradecimento especial, pelo tempo, atenção e ajuda. Saiba que a orientação começou desde o dia em que te conheci, pois me sinto extremamente privilegiada pela oportunidade de trabalhar com uma mulher tão inteligente. Você merece o mundo.

*O caminho seria longo.
Todos os caminhos que levam aos desejos do coração são longos.*

Joseph Conrad

RESUMO

O crescimento econômico, embora essencial para a prosperidade, frequentemente gera impactos ambientais negativos, como o aumento das emissões de gases de efeito estufa. Essa dinâmica torna-se um dilema particular para países em desenvolvimento. Nesse contexto, a hipótese da Curva de Kuznets Ambiental (CKA) busca examinar a relação entre o crescimento econômico e a degradação ambiental. Dessa forma, este estudo objetiva avaliar em qual estágio da CKA o Brasil se encontra. Para tanto, a metodologia empregada consistiu em uma abordagem econométrica de dados em painel, utilizando como variáveis a emissão per capita de dióxido de carbono e o Produto Interno Bruto per capita, compreendendo o período de 1997 a 2022. Os resultados obtidos sugerem uma relação complexa entre crescimento e emissões, indicando que a CKA pode não se manifestar de forma uniforme para países em desenvolvimento. Em particular, observa-se que a fase inicial de crescimento no Brasil ainda contribui para o aumento das emissões, e fatores como o setor de uso da terra têm sido determinantes na composição das emissões brutas. A pesquisa busca complementar o debate sobre políticas de desenvolvimento sustentável e estratégias de mitigação climática no cenário brasileiro.

Palavras-chave: Curva de Kuznets Ambiental; Emissões de CO₂ no Brasil; Crescimento Econômico; Poluição.

ABSTRACT

While economic growth seems essential for prosperity, it often generates negative environmental impacts, such as increased greenhouse gas emissions, which becomes a particular dilemma for developing countries. In this context, the Environmental Kuznets Curve (EKC) hypothesis seeks to examine the relationship between economic development and environmental degradation. Therefore, this study aims to assess at what stage of the EKC Brazil is currently situated. To this end, the methodology employed consisted of an econometric panel data approach, using per capita carbon dioxide emissions and per capita Gross Domestic Product as variables, covering the period from 1997 to 2022. The results obtained suggest a complex relationship between growth and emissions, indicating that the EKC may not manifest uniformly across developing countries. In particular, it is observed that the initial growth phase in Brazil still contributes to increased emissions, and factors such as the land use sector have been determinants in the composition of gross emissions. This research seeks to complement the debate on sustainable development policies and climate mitigation strategies in the Brazilian context.

Keywords: Environmental Kuznets Curve; CO₂ Emissions in Brazil; Economic Growth; Pollution.

LISTA DE FIGURAS

Figura 01 – Curva de Kuznets Ambiental Tradicional.....	20
Figura 02 – Efeito das Políticas Ambientais sobre a CKA.....	21
Figura 03 – Curva de Kuznets Ambiental em forma de N.....	22
Figura 04 – Possíveis resultados para a relação entre a Renda <i>per capita</i> e as Emissões de CO _{2e}	27

LISTA DE TABELAS

Tabela 01 – Resultados da Regressão Quadrática (CKA Tradicional).....	31
Tabela 02 – Modelos Alternativos de Robustez.....	33

LISTA DE ABREVIATURAS

CKA – Curva de Kuznets Ambiental

IPCC – Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas

SEEG – Sistema de Estimativas de Emissões e Remoções de Gases do Efeito Estufa

CO_{2e} – Dióxido de carbono equivalente

IPEA – Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

SUMÁRIO

1.Introdução.....	12
2.Revisão Bibliográfica.....	15
2.1 A utilização de combustíveis fósseis.....	15
2.2 Mecanismos da Curva de Kuznets Ambiental.....	19
2.3 Evidências Empíricas da Curva de Kuznets Ambiental.....	23
3.Metodologia.....	26
3.1 Fonte de Dados	29
4.Resultados e Discussões.....	31
5.Considerações Finais	36
Referências	37

1. INTRODUÇÃO

A lógica da acumulação de riquezas entre nações, inaugurada no período Mercantilista entre o século XV e XVIII, encontrou no crescimento econômico o seu equivalente contemporâneo, sendo este tido como indispensável para assegurar o êxito da prosperidade nas mesmas (Pereira; Junior, 2021). No entanto, de acordo com os autores, esse progresso nem sempre ocorre de forma equilibrada, frequentemente resultando em externalidades negativas, como degradação ambiental, poluição, desmatamento e aumento das emissões de gases de efeito estufa. Esse *trade-off* torna-se ainda mais evidente em países em desenvolvimento, que enfrentam o desafio de promover o crescimento econômico com a necessidade de preservar seus recursos naturais.

Nesse contexto, os trabalhos de Grossman e Krueger (1991, 1995) constituíram um marco conceitual acerca da discussão sobre a relação entre crescimento econômico e degradação ambiental, temática que passou a integrar a agenda do chamado desenvolvimento sustentável.

O principal dilema enfrentado por países emergentes consiste em expandir suas economias e melhorar a qualidade de vida da população ou adotar medidas rigorosas de proteção ambiental, que podem impor restrições ao crescimento no curto prazo. Enquanto países desenvolvidos já passaram por períodos de intensa degradação e atualmente operam com padrões tecnológicos e regulatórios mais avançados, nações em desenvolvimento ainda dependem fortemente de setores produtivos intensivos em recursos naturais.

É nesse panorama que se insere a hipótese da Curva de Kuznets Ambiental (CKA), que pretende verificar a relação entre crescimento econômico e degradação ambiental. Respalhada na teoria de Simon Kuznets (1965), que analisou, para o período de 1960, a relação entre crescimento econômico e desigualdade de renda nos Estados Unidos, Grã-Bretanha e Alemanha, a CKA sugere que, nos estágios iniciais do crescimento econômico, a degradação ambiental se intensifica em virtude do aumento da produção e da exploração de recursos naturais. Essa primeira etapa é classificada como efeito escala. Entretanto, à medida que a economia incipiente amadurece, ela é passível de experienciar o chamado efeito composição, que seria a transição para setores menos poluentes da indústria. Posteriormente, o efeito composição traz consigo o efeito técnico, que diz respeito aos avanços tecnológicos

logrados, que permitem a adoção de práticas sustentáveis e resultam em uma redução dos impactos ambientais (Grossman e Krueger 1991; 1995).

O fenômeno supracitado foi inicialmente concebido como uma representação gráfica em formato de U invertido, conforme proposto por Simon Kuznets (1965), no âmbito de crescimento econômico e desigualdade. A localização precisa do ponto de inflexão, no entanto, permanece objeto de intensos debates na literatura contemporânea (Stern, 2004). A validade empírica dessa formulação é amplamente discutida, especialmente diante da necessidade de considerar as distintas configurações institucionais e políticas que caracterizam os diferentes países, elementos que, em última instância, condicionam sua aplicabilidade e a possibilidade de generalização nos resultados a variados contextos (Dasgupta et al., 2002; Arrow et al., 1995).

O Brasil se insere de maneira central nesse debate. Como país em desenvolvimento e com uma economia majoritariamente exportadora de bens primários, como a soja, o petróleo e o minério de ferro, calcada na exploração de recursos naturais, é um desafio equilibrar crescimento e sustentabilidade (Pereira; Junior, 2021). No contexto brasileiro, o compromisso assumido no Acordo de Paris contrasta com o avanço do desmatamento, que, por sua vez, intensifica as emissões de carbono. Esse fator evidencia a necessidade de avaliar se o cenário econômico atual segue a mudança na trajetória da curva de U invertido ou se há a necessidade de novas estratégias para mitigar os impactos ambientais. Em 2021, o Brasil registrou emissões brutas de carbono equivalente per capita de 11,1 toneladas, enquanto a média global foi de 6,2 toneladas (SEEG 2023).

Diante desse cenário, o presente estudo tem como objetivo investigar a validade empírica da Curva de Kuznets Ambiental no contexto brasileiro, analisando a relação entre crescimento econômico e degradação ambiental durante o período compreendido entre 1997 a 2022, a partir de variáveis como PIB e emissões de CO₂ equivalente. Ao explorar essa dinâmica, pretende-se contribuir para a compreensão dos limites e das possibilidades do desenvolvimento sustentável no país, bem como oferecer subsídios para a formulação de políticas públicas que conciliem crescimento econômico com a preservação de recursos naturais.

Adicionalmente, é relevante contextualizar que alguns países desenvolvidos, como Estados Unidos, Alemanha, Suíça e Suécia, já teriam ultrapassado o ponto de inflexão da CKA, reduzindo significativamente seus níveis de poluição mesmo com

crescimento econômico contínuo. Isso se deve, em grande parte, à adoção de políticas ambientais rigorosas, à transição para setores produtivos menos poluentes e à incorporação de tecnologias limpas (Stern, 2004; Panayotou, 2000). No entanto, autores como Copeland e Taylor (2004) e Antweiler et al. (2001) argumentam que parte desse resultado também pode ser explicado pela terceirização de atividades industriais poluentes para países com legislações ambientais mais permissivas, fenômeno conhecido como *leakage effect* ou *pollutior haven hypothesis*. Dessa forma, não se pode presumir que o Brasil seguirá a mesma trajetória desses países, uma vez que o contexto institucional, econômico e ambiental é substancialmente diferente. Tal dinâmica reforça a necessidade de análises específicas e estratégias próprias para lidar com o desafio da sustentabilidade em países emergente (Sachs, 2015).

O presente ensaio também dialoga com a Agenda 2030 da Organização das Nações Unidas, especialmente com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), ao abordar a interseção entre crescimento econômico e sustentabilidade ambiental. Em particular, este estudo contribui com os debates em torno do ODS 8 (Trabalho decente e crescimento econômico), do ODS 12 (Consumo e produção responsáveis) e, sobretudo, do ODS 13 (Ação contra a mudança global do clima). Ao investigar empiricamente a Curva de Kuznets Ambiental no contexto brasileiro, busca-se fornecer evidências que subsidiem políticas públicas capazes de conciliar crescimento econômico com a preservação dos recursos naturais e a mitigação das mudanças climáticas.

Nesse sentido, este trabalho está estruturado em cinco seções: a Seção 1 apresenta a introdução e a delimitação do tema; a Seção 2 discute o referencial teórico relacionado à Curva de Kuznets Ambiental, seus mecanismos explicativos e críticas; a Seção 3 descreve a metodologia utilizada na pesquisa; a Seção 4 traz a análise dos dados e a discussão dos resultados obtidos; e, por fim, a Seção 5 apresenta as considerações finais e sugestões para estudos futuros.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A compreensão da relação entre crescimento econômico e degradação ambiental requer o resgate de fundamentos teóricos e empíricos que moldaram esse debate ao longo do tempo. A literatura sobre a CKA emerge como um dos principais referenciais analíticos para investigar essa interação, especialmente em países em desenvolvimento. Nesta seção, apresentam-se as bases conceituais que sustentam a hipótese da CKA, destacando os mecanismos causais envolvidos, as críticas ao modelo tradicional em forma de U invertido e os avanços nas interpretações contemporâneas, como as curvas em formato de N. Além disso, são discutidas evidências empíricas internacionais e nacionais, com ênfase nas especificidades do caso brasileiro, permitindo uma análise crítica das diferentes metodologias e resultados encontrados na literatura.

2.1 A utilização de combustíveis fósseis

A Revolução Industrial, iniciada na Inglaterra a partir do século XVIII, transformou profundamente a dinâmica das relações de trabalho (Pott; Estrela, 2017). De acordo com os autores, a mudança da manufatura para a indústria mecânica viabilizou um salto de produtividade sem precedentes e trouxe consigo a possibilidade de avanços tecnológicos que reconfiguraram a economia e a sociedade.

Conforme argumenta Pereira (2019), a expansão populacional, combinada com a urbanização, resultou em um aumento expressivo na demanda por energia, empregada em transportes, no condicionamento de ambientes e no funcionamento de indústrias de pequeno porte. Segundo o autor, essa demanda crescente impulsionou a exploração do carvão mineral, devido à abundância na natureza e ao seu alto rendimento energético por unidade transportada, superando, nesses aspectos, a madeira, que era o combustível mais utilizado até então.

Simultaneamente, segundo Humphrey e Stanislav (1979), a extração de madeira exigia o avanço para áreas cada vez mais distantes dos centros logísticos. Tal cenário fomentou a competitividade do carvão mineral frente à lenha. Além disso, sua utilização não exigia adaptações nos equipamentos que tradicionalmente funcionavam à base de lenha, como fornos, lareiras e aquecedores. Desta forma, o carvão mineral se consolidou como o primeiro combustível fóssil a ser utilizado em larga escala (Humphrey e Stanislav; 1979).

Durante o século XIX, o carvão manteve sua posição dominante como matriz energética na Europa e nos Estados Unidos, alimentando locomotivas, siderúrgicas e sistemas urbanos de calefação. Contudo, foi a partir do início do século XX que o petróleo passou a assumir protagonismo, especialmente com a ascensão da indústria automobilística e a mecanização agrícola. Após a Segunda Guerra Mundial, o crescimento econômico acelerado, impulsionado pela reconstrução dos países industrializados e pela consolidação do modelo fordista de produção em massa, elevou drasticamente o consumo energético global. O gás natural também ganhou espaço, especialmente em países como os Estados Unidos e a antiga União Soviética. Entre as décadas de 1950 e 1970, os combustíveis fósseis já sustentavam a maior parte da economia global, com impactos ambientais acumulados, embora ainda subestimados no debate público e político (Motta, 1999; Panayotou, 1993; Beckerman, 1992). Esse período marca a consolidação de um modelo energético baseado na disponibilidade abundante, no baixo custo e na aparente “neutralidade ambiental” dos recursos fósseis.

Esse movimento inaugurou um padrão energético baseado em combustíveis fósseis, que, ao longo dos séculos XIX e XX, incluiu também o petróleo e o gás natural. A intensificação produtiva impulsionada pelo uso desses insumos teve como consequência o aumento da emissão de gases de efeito estufa (GEE), especialmente CO_2 e CH_4 , este último com potencial vinte vezes maior de retenção térmica, segundo Silva e Paula (2015). A permanência prolongada desses gases na atmosfera – por mais de cem anos – desencadeia processos de instabilidade climática e aquecimento global.

Entre 2011 e 2020, a temperatura média global esteve $1,1^\circ\text{C}$ acima dos níveis pré-industriais, de acordo com o Painel Intergovernamental para Mudanças Climáticas da ONU (IPCC 2021). Ademais, entre 1970 e 2004 as emissões de gases de efeito estufa aumentaram 70% (IPCC 2007). Silva e Paula (2015), sinalizam que os principais gases de efeito estufa emitidos por vias antrópicas são o CO_2 e o CH_4 , este vinte vezes mais potente que o primeiro. A liberação dessas substâncias tem potencial de acelerar o processo de aquecimento terrestre, em virtude de o tempo de permanência dos mesmos na atmosfera ser superior a cem anos, de acordo com os autores. Essa dinâmica implica em instabilidade e imprevisibilidade climática, como exemplifica o recente fenômeno de branqueamento de corais, observado em diversas regiões tropicais do planeta.

De acordo com o Sexto Relatório de Avaliação do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC, 2021), o aumento da temperatura dos oceanos, impulsionado pela intensificação do efeito estufa, causa um estresse térmico nos recifes de coral, levando à expulsão das zooxantelas, algas simbióticas responsáveis pela sua coloração e nutrição. Essa perda não apenas compromete a vibrante biodiversidade marinha que depende intrinsecamente desses ecossistemas complexos, como peixes, moluscos e crustáceos, mas também desencadeia efeitos multidimensionais que atingem diretamente as populações humanas (Brown, 1997). A degradação dos recifes implica na diminuição da oferta de alimentos para comunidades costeiras que dependem da pesca artesanal, exacerbando a insegurança alimentar e impactando negativamente a economia local, o turismo e a proteção costeira natural proporcionada por essas estruturas (Hughes et al., 2012).

Ainda que países desenvolvidos, como os Estados Unidos, tenham historicamente contribuído em maior proporção para o aumento dos GEE na atmosfera, a queima de combustíveis fósseis em países em desenvolvimento soma um total de 42,5% (IPCC 2007). Em 2015, o Brasil emitiu 1,92 GtCO₂ (carbono equivalente), representando 3,5% das emissões globais anuais. Apesar de ocupar 5% da superfície terrestre, sua contribuição para as emissões mundiais é pequena, embora sua posição entre os emissores seja elevada. Ocupando a sétima maior emissão do planeta, o país fica atrás de China (25,2%), EUA (12%), Índia (7%), União Europeia (6,6%), Rússia (4,1%) e Indonésia (4%). A nível nacional, há destaque nas emissões do setor de uso da terra e florestas, seguido pelo setor de energia, conforme dados do Sistema de Estimativas de Emissões de Gases de Efeito Estufa (SEEG, 2021).

No relatório publicado em 2021, o IPCC sinaliza uma necessidade de redução pela metade nas emissões de gases do efeito estufa até 2030, a fim de limitar o aquecimento a, no máximo, 1,5°C, de maneira que seja possível a adaptação humana às condições climáticas adversas. Para que tal meta seja alcançada, se faz necessária a substituição dos combustíveis fósseis por fontes de energias renováveis. De acordo com a Agência Internacional de Energia Renovável (IRENA) de 2020, um quarto da energia primária da América Latina provém de fontes renováveis, o dobro da média global.

Atualmente, as implicações socioeconômicas e ambientais do aquecimento global, como a insegurança alimentar, os desastres naturais e a perda de

biodiversidade, têm motivado um esforço internacional na busca por soluções sustentáveis. Segundo o publicado por IRENA (2020) e o Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC) de 2021, a mitigação dos efeitos das mudanças climáticas exige não apenas a substituição dos combustíveis fósseis por fontes de energia renovável, mas também uma reestruturação profunda dos sistemas produtivos e de consumo. Nesse sentido, a construção de um futuro sustentável demanda ações coordenadas que integrem inovação tecnológica, políticas públicas eficazes e mudanças nos padrões de comportamento social e econômico (World Bank, 2021).

O uso crescente de combustíveis fósseis nos estágios iniciais do crescimento econômico representa o que a literatura denomina efeito escala na CKA. Nesse estágio, a expansão das atividades produtivas ocorre sem preocupações ambientais significativas, priorizando o aumento do produto agregado a partir da exploração intensiva de recursos naturais. A combustão de carvão, petróleo e gás natural insere-se nesse processo como um vetor de modernização e industrialização, mas também como elemento central da intensificação da degradação ambiental (Grossman; Krueger, 1991; Dasgupta et al., 2002). Com isso, o crescimento econômico passa a gerar, simultaneamente, aumento do PIB e dos níveis de poluição, movimento típico das economias ainda não submetidas a uma inflexão ecológica significativa.

Além disso, o debate atual sobre justiça climática e responsabilidade histórica aponta que os países do Norte global acumularam crescimento e riqueza às custas de elevados níveis de emissões, enquanto os países do Sul global enfrentam as consequências ambientais de um sistema que pouco contribuíram para criar (Martinez-Alier, 2002; Roberts; Parks, 2007). Essa assimetria histórica reforça o argumento de que os custos da transição energética não podem ser igualmente distribuídos entre países em níveis tão diferentes de desenvolvimento socioeconômico.

Portanto, o histórico de utilização de combustíveis fósseis e seus impactos climáticos globais refletem o desafio intrínseco à primeira fase da CKA. O caso brasileiro evidencia os dilemas enfrentados por países em desenvolvimento que buscam crescer sob restrições ambientais, dependência energética e desigualdades estruturais. A seguir, aprofundam-se os fundamentos teóricos da Curva de Kuznets Ambiental, com destaque para seus mecanismos explicativos, críticas recorrentes e evidências empíricas sobre sua validade.

2.2. Mecanismos da Curva de Kuznets Ambiental

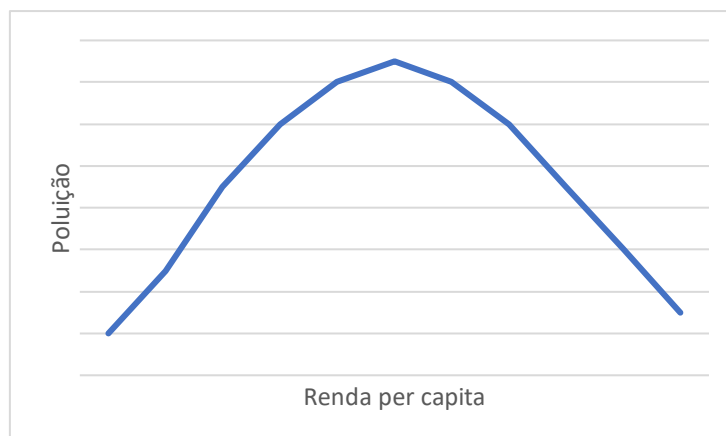
A Curva de Kuznets Ambiental (CKA) é uma adaptação do modelo proposto por Kuznets (1955), que originalmente relacionava crescimento econômico e desigualdade de renda em formato de U invertido. Ao transpor essa lógica para a esfera ambiental, Grossman e Krueger (1991) identificaram, em estudo sobre os possíveis impactos do Acordo de Livre Comércio da América do Norte (NAFTA), uma relação similar entre renda per capita e níveis de poluição atmosférica, especialmente para poluentes como o dióxido de enxofre (SO_2). Os autores demonstraram que, em países com baixa renda, o crescimento econômico tende a aumentar a poluição, mas, após certo nível de renda, há uma tendência de reversão, sugerindo que a qualidade ambiental melhora com o desenvolvimento (Grossman; Krueger, 1995).

Essa trajetória é explicada por três efeitos centrais: o efeito escala, o efeito composição e o efeito técnico. O efeito escala refere-se à intensificação da degradação ambiental como consequência do aumento da atividade econômica. Nos estágios iniciais de crescimento, o aumento da produção e do consumo implica maior exploração dos recursos naturais, maior emissão de poluentes e resíduos, muitas vezes sem regulamentação ambiental eficaz (Dasgupta et al., 2002). Nesse contexto, as prioridades da população ainda são a geração de renda e emprego, relegando a qualidade ambiental a um plano inferior.

Com o amadurecimento econômico, o efeito composição se manifesta na reestruturação da economia: há redução da participação relativa de setores industriais pesados e poluentes e aumento de atividades ligadas aos serviços e à tecnologia, geralmente menos intensivas em emissão de poluentes (Panajotou, 2003). Finalmente, o efeito técnico relaciona-se com o avanço tecnológico e a difusão de práticas produtivas mais limpas. Com o aumento da renda, crescem os investimentos em inovação, e a pressão da sociedade leva à adoção de tecnologias ambientalmente eficientes (Dinda, 2004).

Esse comportamento é ilustrado na Figura 1, que representa a Curva de Kuznets Ambiental clássica em forma de U invertido:

Figura 1 – Curva de Kuznets Ambiental Tradicional



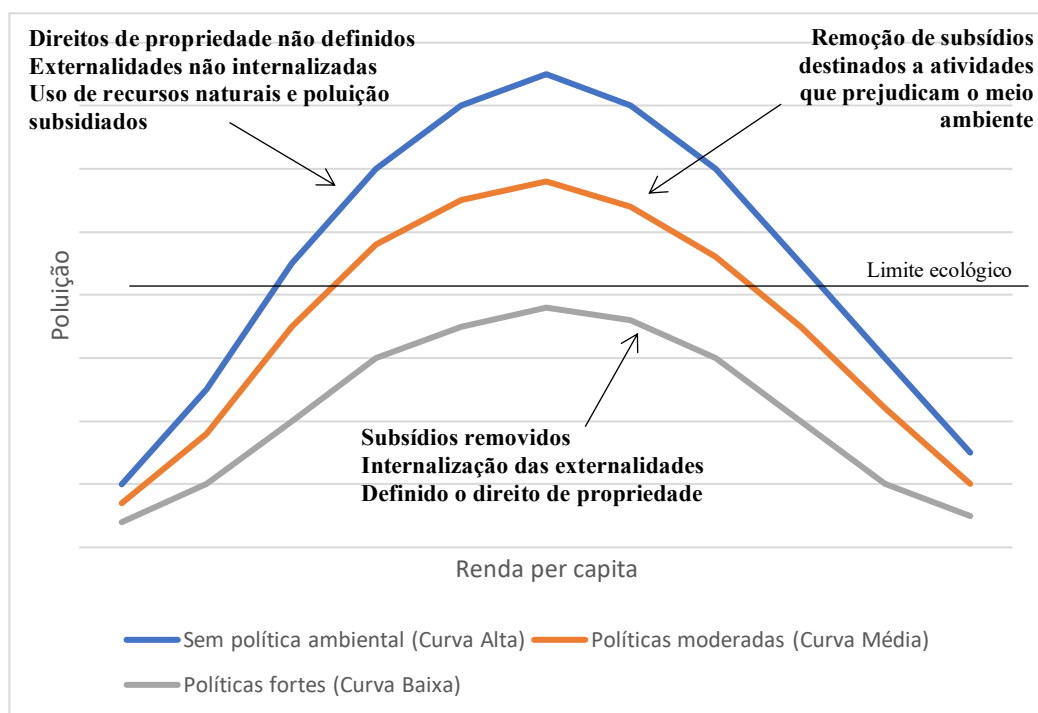
Fonte: Elaborado pelo autor a partir de Dinda (2004).

À medida que os países atingem níveis mais altos de renda, a demanda por qualidade ambiental se intensifica. Essa demanda é interpretada como um bem de luxo, cuja elasticidade-renda é superior a um, o que significa que, com o aumento da renda, a disposição da população em pagar por bens e serviços ambientais cresce ainda mais (Varian, 2000). Nesse sentido, Yandle et al. (2002) afirma que, em economias de alta renda, os gastos com amenidades ambientais superam os destinados a bens básicos.

As políticas públicas também desempenham papel fundamental no deslocamento do ponto de inflexão da curva. Regulamentações ambientais eficazes, impostos pigouvianos e a definição clara de direitos de propriedade contribuem para antecipar o pico da curva e mitigar os efeitos do crescimento econômico sobre o meio ambiente.

A Figura 2 indica como a CKA pode ser “achatada” com a implementação de políticas de proteção ambiental.

Figura 2 – Efeito das Políticas Ambientais sobre a CKA



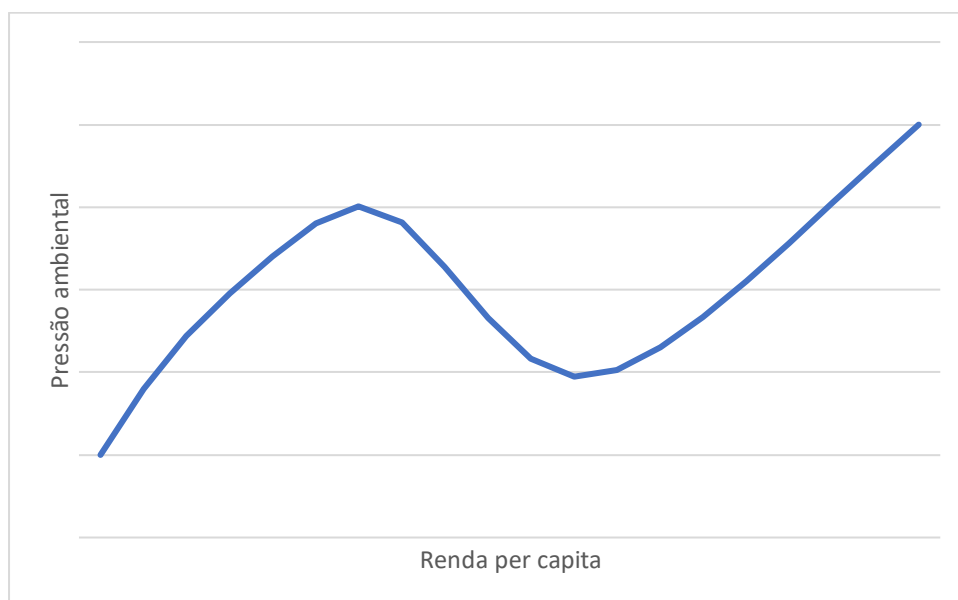
Fonte: Elaborado pelo autor a partir de Yandle et al. (2002).

Contudo, apesar de sua popularidade, a CKA é alvo de críticas. Uma das principais refere-se à transferência da poluição entre países, fenômeno conhecido como *"pollution haven hypothesis"*. Nesse cenário, países desenvolvidos, após atingirem o ponto de inflexão da curva, deslocam suas atividades industriais mais poluentes para nações com legislações ambientais mais brandas (Copeland; Taylor, 2003). Esse processo, longe de representar uma verdadeira melhoria ambiental global, implica apenas em realocação geográfica da poluição. A Suécia, a Suíça e a Alemanha, por exemplo, são frequentemente citadas como países que ultrapassaram o pico da CKA para diversos poluentes locais, mas estudos apontam que parte de suas cadeias de produção permanece externalizada para países em desenvolvimento (Jug; Mirza, 2005).

Além disso, há evidências empíricas de que a relação entre crescimento e degradação ambiental pode não seguir uma forma de U invertido, mas sim um padrão em "N". Nesse caso, após a melhora ambiental relacionada ao aumento da renda, uma nova fase de degradação ambiental pode emergir, especialmente se o crescimento econômico se basear em consumo excessivo ou reindustrialização intensiva. Essa possibilidade é ilustrada na Figura 3, proposta por Almeida e Carvalho

(2008), e reforça a ideia de que os ganhos ambientais não são necessariamente permanentes.

Figura 3 – Curva de Kuznets Ambiental em forma de N



Fonte: Elaborado pelo autor a partir de Almeida e Carvalho (2008, p. 7).

Esse tipo de instabilidade também é agravado pelo processo de globalização econômica. Segundo Blanchard (2011), a abertura comercial e a mobilidade de capital levam à realocação de indústrias para regiões onde a regulação ambiental é menos rígida. Países em desenvolvimento, como o Brasil, podem inclusive reduzir seus padrões ambientais para atrair investimentos estrangeiros, perpetuando um ciclo de crescimento poluidor (Copeland; Taylor, 1995; Dinda, 2002). Dessa forma, a CKA, ao ser observada apenas em escala nacional, pode mascarar os impactos ambientais transferidos para outras regiões do globo.

Dessa forma, a Curva de Kuznets Ambiental fornece uma estrutura útil para compreender parte da dinâmica entre crescimento econômico e degradação ambiental. No entanto, sua aplicação exige uma análise crítica e contextualizada. O crescimento, por si só, não assegura a melhoria ambiental. Sem políticas públicas eficazes, instituições reguladoras fortes e responsabilidade corporativa e social, o padrão de degradação pode persistir ou mesmo se intensificar. No caso do Brasil, as desigualdades regionais, a dependência de setores primários e a fragilidade institucional tornam a hipótese da CKA ainda mais complexa, indicando que a

transição para uma trajetória sustentável deve ser guiada por estratégias próprias e comprometidas com justiça socioambiental.

2.3 Evidências Empíricas da Curva de Kuznets Ambiental

A Curva de Kuznets Ambiental (CKA) tem sido objeto de intenso escrutínio empírico nas últimas décadas, com resultados que variam conforme o contexto geográfico, o poluente analisado e os métodos econométricos empregados. A hipótese central sugere uma relação em formato de “U” invertido entre a renda per capita e a degradação ambiental: em estágios iniciais de crescimento, as emissões aumentam, mas, após determinado ponto de inflexão, tendem a declinar. No entanto, estudos contemporâneos vêm revelando variações significativas dessa hipótese, especialmente quando se consideram países em desenvolvimento, setores específicos e externalidades globais.

No contexto brasileiro, pesquisa recente de Fracasso et al. (2023) utilizou dados dos estados brasileiros entre 1980 e 2020 para testar a presença da CKA para os poluentes CO_2 , CH_4 e N_2O . Os resultados confirmaram a hipótese para o dióxido de carbono e o óxido nítrico, mas não para o metano, sugerindo que a dinâmica de certos gases pode não responder linearmente à elevação da renda, e que fatores como matriz energética e uso da terra devem ser controlados nos modelos econométricos. O estudo aplicou técnicas de painel dinâmico com correções para heterocedasticidade e autocorrelação, garantindo robustez estatística aos achados (Fracasso et al., 2023)

Em estudo setorial, Fernandes et al. (2021) avaliaram a CKA no setor de transporte de soja no Brasil entre 2002 e 2017. Os resultados revelaram uma curva em formato de “N”, em que as emissões inicialmente aumentam, depois declinam, mas voltam a crescer com o contínuo crescimento econômico. Esse padrão não linear levanta a hipótese de que os ganhos ambientais oriundos de avanços tecnológicos ou de políticas regulatórias podem ser revertidos em fases posteriores do desenvolvimento, particularmente quando não há mudança estrutural na matriz de transportes (Fernandes et al., 2021).

Em escala global, Zhao et al. (2024) conduziram um estudo com 182 países entre 1990 e 2020, empregando modelos de painel com efeitos fixos e variáveis instrumentais para corrigir endogeneidade. A CKA foi identificada em diversos países,

tanto de alta quanto de média renda, mas com diferenças marcantes no ponto de inflexão e na intensidade dos efeitos. A pesquisa ressalta que a qualidade das instituições ambientais, a regulação governamental e o investimento em tecnologias limpas são determinantes cruciais para o padrão da curva (Zhao et al., 2024).

Entre os países emergentes, destaca-se o estudo de Balsalobre-Lorente et al. (2018) sobre os BRICS. Os autores aplicaram o teste de causalidade de Dumitrescu-Hurlin e a abordagem ARDL (*Autoregressive Distributed Lag*), e confirmaram a CKA apenas para China e Índia, associando os resultados à rápida transição industrial e às políticas ambientais em curso. No caso do Brasil, os resultados foram inconclusivos, o que aponta para a necessidade de considerar a heterogeneidade regional e setorial. Em países desenvolvidos, os estudos apontam resultados mais consistentes com a hipótese tradicional da CKA. Na Suécia, Stern et al. (2017) aplicaram técnicas de cointegração para séries temporais longas e constataram que o país ultrapassou o ponto de inflexão da curva ainda nos anos 1980, em parte graças a políticas de precificação do carbono e regulação ambiental robusta. Já na Suíça, a pesquisa de Roth et al. (2020) destacou o papel das exportações e da terceirização da produção em países com legislações ambientais mais frágeis, sugerindo que o aparente declínio interno da poluição pode mascarar uma externalização dos impactos ambientais, fenômeno conhecido como “efeito paraíso da poluição”.

É importante destacar que os formatos alternativos da curva também vêm sendo documentados. A curva em formato de “N” (inicialmente crescente, depois decrescente e, novamente, crescente) tem sido observada, especialmente em economias que não implementam políticas ambientais estruturais e sustentáveis. Almeida e Carvalho (2008) apontam que o aumento da renda pode criar novas demandas energéticas e de consumo que superam os ganhos ambientais iniciais, reacendendo o crescimento das emissões.

Além disso, há uma crítica metodológica importante a ser considerada: muitos estudos falham em incluir variáveis institucionais, culturais e políticas, o que compromete a validade externa dos modelos. Panayotou (2003) e Dinda (2004) defendem a incorporação de variáveis de governança ambiental, como efetividade regulatória, compliance legal e participação social, como forma de refinar a análise empírica.

Portanto, embora a literatura empírica ofereça respaldo parcial à hipótese da Curva de Kuznets Ambiental, sua validade é altamente dependente do contexto

institucional, político e tecnológico de cada país. A existência de evidências contraditórias, a diversidade metodológica dos estudos e a complexidade dos determinantes ambientais apontam para a necessidade de abordagens integradas, com modelos que incluam não apenas renda per capita, mas também variáveis estruturais, setoriais e políticas. O avanço da agenda empírica sobre a CKA requer, assim, maior sofisticação analítica e comprometimento com a multidimensionalidade da sustentabilidade.

3. METODOLOGIA

As contribuições de Grossman e Krueger (1995) sugerem que o aumento da renda *per capita* suscita em uma alteração nos valores de referência de poluição, de modo a aumentá-los ou diminuí-los. Este efeito é produto de uma relação inversa entre as variáveis, que resulta em uma representação gráfica com formato de “U” invertido, ou seja, uma parábola que apresenta a concavidade na parte inferior da curva (para baixo).

Para compreender a relação entre poluição e crescimento econômico a partir de dados de origem nacional, o presente estudo utiliza uma abordagem quantitativa, a partir da técnica econométrica de Regressão Múltipla por Mínimos Quadrados Ordinários (MQO), utilizando dados em painel para estimar o modelo, seguindo a tendência de pesquisas precursoras que buscavam verificar a hipótese da Curva Ambiental de Kuznets.

A estimação do modelo será feita a partir da seguinte Equação:

$$Y_t = \alpha + \beta_1 X_t + \beta_2 X_t^2 + \beta_3 X_t^3 + \mu_t$$

Onde:

Y - Emissões de dióxido de carbono equivalente per capita (CO_{2e})

α - constante

X - renda per capita

μ - erro estocástico

τ - tempo

Sendo a Emissão de CO_2 a variável dependente, o modelo possibilita aferir a relação entre as variáveis pretendidas. A natureza da relação, bem como o comportamento da curva, é inerente aos sinais que adotam os coeficientes após a estimação. Quanto aos resultados, diferentes combinações sugerem diferentes interpretações, conforme elucidou Lucena (2005). Sendo as combinações possíveis:

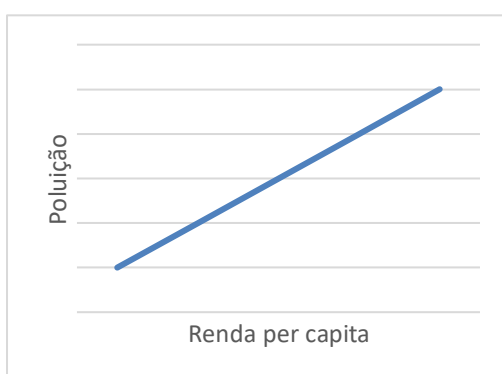
- (i) Se $\beta_1 > 0$ e $\beta_2 = \beta_3 = 0$, a renda *per capita* e a emissão de CO_{2e} apresentam uma relação positiva e linear, logo, o aumento da primeira variável equivale ao aumento constante da segunda variável (figura 4.1);
- (ii) Se $\beta_1 < 0$ e $\beta_2 = \beta_3 = 0$, a renda *per capita* e a emissão de CO_{2e} apresentam uma relação negativa e linear (figura 4.2);
- (iii) Se $\beta_1 > 0$, $\beta_2 < 0$ e $\beta_3 = 0$, a renda *per capita* e a emissão de CO_{2e} apresentam uma relação inversamente proporcional, de modo a confirmar

a hipótese da CAK. $\beta_2 < 0$ ratifica a concavidade voltada para baixo, enquanto o vértice da curva diz respeito ao ponto de inflexão, onde há a mudança na orientação da curva (diminuição da poluição) (figura 4.3).

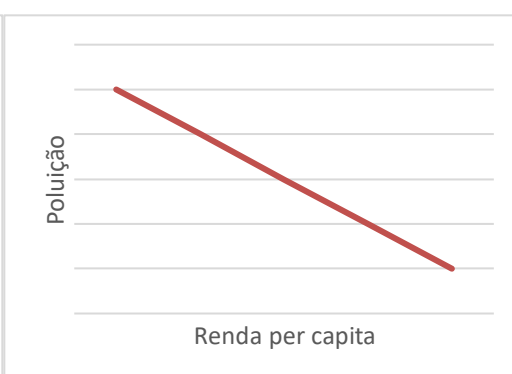
(iv) Se $\beta_1 > 0$, $\beta_2 < 0$ e $\beta_3 > 0$, a relação observada entre as variáveis se alinha com a hipótese de CAK em formato de “N” (Figura 4.4).

Figura 4 – Possíveis resultados para a relação entre a Renda *per capita* e Emissões de CO_{2e}

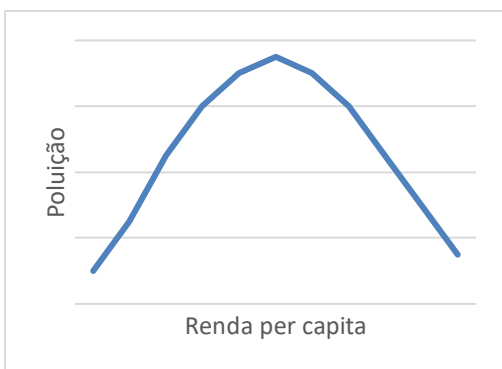
4.1 Relação linear e positiva



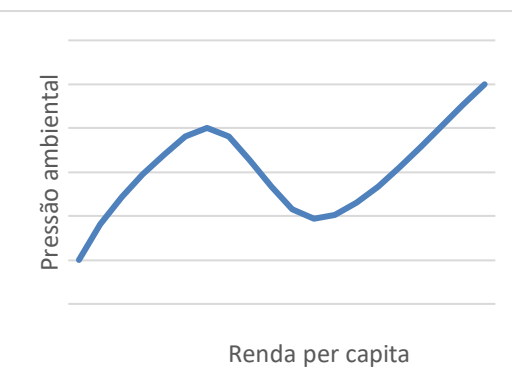
4.2 Relação linear e negativa



4.3 Relação inversamente proporcional



4.4 Curva em formato “n”



Fonte: elaborada pelo autor a partir de Lucena (2005)

De acordo com Gujarati e Porter (2012), a regressão por Mínimos Quadrados Ordinários é eficaz para mensurar os parâmetros de um determinado modelo, mas quando se trata de realizar inferências a respeito deste, ou seja, interpretá-los, é necessário que o modelo esteja de acordo com hipóteses. São elas:

- Embora o modelo de regressão seja linear nos parâmetros, este não obrigatoriamente será linear nas variáveis.
- A covariância de X, assim como o erro, são iguais a 0 (). Uma vez que os valores da variável X são independentes do erro, é concebível

mensurar os efeitos individuais de cada variável X , assim como e o erro na variável Y .

- A variância do erro é constante, logo, ela permanece a mesma não se altera de acordo com os valores de (X) .
- Para distintos valores de X , o produto das diferenças entre Y e o Y estimado não devem configurar nenhuma espécie de padrão entre si. Ou seja, é necessário que não exista autocorrelação entre os termos do erro (para todo i diferente de j).
- A quantidade do número de observações precisa ser precisa ser superior a quantidade de parâmetros estimados.
- Devem apresentar variabilidade os valores da variável X .
- Os regressores não devem apresentar uma combinação linear precisa dos outros regressores do modelo. Em outras palavras, não é aceitável que as variáveis X apresentem colinearidade exata entre si.

A conformidade com essas hipóteses é necessária para assegurar a lisura do rigor metodológico, contemplando a especificação correta do modelo e, assim, verificar a hipótese da Curva de Kuznets Ambiental a partir do valor estimado dos parâmetros.

Com a finalidade de encontrar relações graficamente representadas por “U” invertido ou “N”, o modelo aplicado neste trabalho faz uso de uma regressão polinomial. Gujarati e Porter (2012) afirmam que, a despeito deste tipo de modelo só conter uma variável explicativa, a mesma é considerada uma regressão múltipla, em decorrência de a variável explicativa se manifestar repetida a várias potências.

Igualmente, embora pareça contraintuitivo, não há evidência de colinearidade no modelo, ainda que as variáveis se tratem do mesmo número à diferentes potências. A hipótese de multicolinearidade não é desrespeitada em virtude das variáveis X elevadas serem, de forma unânime, funções não lineares de X .

Quanto à análise dos resultados, pretende-se comparar os achados com estudos internacionais e nacionais, de forma a identificar convergências ou divergências na validade da CKA no Brasil. Essa comparação permitirá avaliar se o comportamento observado se alinha às experiências de outros países em desenvolvimento ou se apresenta peculiaridades específicas do contexto brasileiro. Em termos de estrutura do relatório final, o trabalho deverá ser organizado da seguinte forma: (i) introdução e delimitação do problema de pesquisa; (ii) revisão de literatura,

abordando os principais fundamentos teóricos, críticas e evidências empíricas; (iii) metodologia, incluindo a descrição dos modelos econométricos, variáveis e fontes de dados; (iv) análise dos resultados, com a interpretação estatística e comparação com a literatura; e (v) considerações finais, que sintetizam as conclusões, limitações e recomendações para estudos futuros.

3.1 Fonte de dados

Para este estudo, a coleta de dados baseou-se em fontes secundárias a partir de sites específicos da internet, priorizando informações de domínio público. Os dados empregados são de séries temporais anuais, compreendendo o período de 1997 a 2022. Este intervalo se justifica em decorrência de ser o ano em que se iniciam os registros das emissões de CO₂ a partir do uso da terra, modalidade que foi responsável por 46% das emissões brutas de Gases de Efeito Estufa no Brasil em 2023 (SEEG 2023).

A composição dessas séries se deu da seguinte forma: o Produto Interno Bruto (PIB) foi obtido junto ao IPEA Data; as emissões de Dióxido de Carbono (CO₂) em milhões de toneladas métricas, resultantes do consumo de energia elétrica, vieram do Sistema de Estimativa de Emissões de Gases de Efeito Estufa (SEEG); e os dados de população foram fornecidos pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE).

Além disso, a escolha pela emissão de CO₂ *per capita* como indicador de degradação ambiental se sucede pelo fato deste ser o principal poluente causador de gases de efeito estufa e, conseqüentemente, do aquecimento global. Conforme apontado por Almeida e Carvalho (2010), essa variável é caracterizada como um fluxo e tem uma relação direta com o nível atual da atividade econômica. Outrossim, a regulação das emissões de CO₂ *per capita* é vista como uma eficaz ferramenta de política ambiental, especialmente por meio do mercado internacional de créditos de carbono – uma estratégia que foi explicitamente abordada na Convenção das Nações Unidas sobre as Alterações Climáticas de 1992.

O PIB *per capita*, por sua vez, é uma variável explicativa amplamente utilizada na literatura sobre CKA, sendo um parâmetro confiável para avaliar a renda de um país. Dessa forma, para cotejar o ponto de inflexão, ou seja, de mudança de orientação na curva, é incorporado ao modelo o PIB *per capita* ao quadrado, de modo

a aferir o nível máximo de emissão em contraste com o nível de renda. A posteriori, além de delinear o formato da curva, o resultado observado é considerado para definir em qual estágio (da curva) se encontra a matriz produtivo-econômica nacional. Cabe recordar que, na hipótese da Curva Ambiental de Kuznets, são três os possíveis estágios.

É importante reconhecer que todos os modelos podem ter limitações. Conforme abordado por Liu (2005), ainda que nações possuam níveis tecnológicos e dotações de fatores semelhantes, estas podem apresentar estruturas industriais distintas devido a decisões de investimento tomadas no passado. Isso significa que, embora o capital agregado desses países possa ser comparável, a composição específica desse capital pode gerar custos de oportunidade diferentes na redução de emissões. Em vista disso, ao estimar modelos que analisam os níveis de emissão de CO₂ *per capita*, é necessário considerar que, para além da renda, as características individuais de um país também desempenham um papel na explicação das variações nos níveis de emissão.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A partir da estimação do modelo econométrico de Mínimos Quadrados Ordinários (Ordinary Least Squares – OLS), é possível testar a hipótese da Curva de Kuznets Ambiental (CKA) no contexto brasileiro ao longo do período de 1997 a 2022. Com esta finalidade, a Tabela 1 apresenta os coeficientes estimados, que constituem a base para compreender a dinâmica entre crescimento econômico e degradação ambiental no país, bem como para fim de comparação com as evidências da Literatura discutida no Capítulo 2.

Período: 1997–2022 | Amostra: 25 observações

Tabela 1 – Resultados da Regressão Quadrática (CKA Tradicional)

Variável	Coeficiente (β)	Erro-padrão (HC1)	Valor t	p-valor	Sinal esperado (CKA)	Sinal encontrado
Constante	0,01931	0,00084	22,87	0,000	—	—
PIB per capita (constante)	$-6,50 \times 10^{-7}$	$7,05 \times 10^{-8}$	-9,22	0,000	(+)	(-)
(PIB per capita) ²	$1,10 \times 10^{-11}$	$1,46 \times 10^{-12}$	7,59	0,000	(-)	(+)
Indicadores complementares:						
R ² ajustado			0,84			
Ponto de inflexão (PIB pc)			R\$ 16.447,60			
Teste de Breusch–Pagan			$\chi^2 = 2,19$ p = 0,334			
VIF médio			≈ 11,4			
Formato da curva			'U' (não invertido)			

Fonte: Elaboração própria

A Tabela 1 apresenta os resultados da regressão quadrática estimada para o modelo da Curva de Kuznets Ambiental (CKA), relacionando as emissões per capita de dióxido de carbono equivalente (CO₂) e ao produto interno bruto per capita (PIBpc), no período de 1997 a 2022. O modelo mostrou-se estatisticamente robusto e apresentou alto poder explicativo, com um R² ajustado de 0,87, o que indica que aproximadamente 84% da variação nas emissões per capita é explicada pela renda per capita e pelo seu termo quadrático.

Os coeficientes estimados para as variáveis de interesse foram estatisticamente significativos ao nível de 1% (p < 0,01) com erros-padrão robustos

(HC1), garantindo consistência frente à possível heterocedasticidade. O teste de Breusch–Pagan ($\chi^2 = 2,19$; $p = 0,334$) não rejeitou a hipótese nula de homocedasticidade, e o *VIF médio* ($\approx 11,4$), embora elevado, é esperado em modelos quadráticos, dada a colinearidade natural entre PIBpc e PIBpc².

Os resultados indicam que o coeficiente linear do PIB per capita ($\beta_1 = -6,50 \times 10^{-7}$) é negativo, enquanto o coeficiente quadrático ($\beta_2 = 1,10 \times 10^{-11}$) é positivo, ambos estatisticamente significativos. Essa combinação de sinais ($\beta_1 < 0$; $\beta_2 > 0$) define uma curva em formato de “U” normal, e não o “U invertido” previsto pela hipótese clássica da CKA (Grossman e Krueger, 1995; Dinda, 2004). Assim, verifica-se que as emissões de CO₂ e per capita diminuem com o crescimento econômico até um ponto mínimo, mas retomam trajetória ascendente a partir de determinado nível de renda.

O ponto de inflexão estimado, obtido pela relação, foi de R\$ 16.447,60 (valores constantes). Isso significa que, até aproximadamente esse nível de renda per capita, o crescimento econômico esteve associado à redução relativa das emissões, mas, a partir desse patamar, as emissões voltaram a crescer. Essa dinâmica caracteriza um processo de reversão parcial dos ganhos ambientais, sugerindo que o Brasil ainda não atingiu o estágio de sustentabilidade ambiental compatível com a hipótese de Kuznets.

O formato em “U” identificado indica que o país ainda se encontra em uma fase intermediária do processo de transição ambiental, em que o crescimento econômico não se dissocia totalmente da degradação ambiental. Tal comportamento é consistente com a literatura empírica sobre economias emergentes, nas quais a estrutura produtiva ainda é fortemente dependente de setores intensivos em recursos naturais (agronegócio, energia fóssil e uso da terra) e onde os ganhos tecnológicos e regulatórios ainda não são suficientes para reverter o impacto ambiental do crescimento (Almeida & Carvalho, 2008; Balsalobre-Lorente et al., 2018; Fracasso et al., 2023).

Em particular, Fracasso et al. (2023) demonstram que, para o caso brasileiro, a hipótese da CKA é confirmada apenas para alguns poluentes específicos, mas não para o CO₂ total, cujas emissões mantêm trajetória ascendente após certo período de estagnação. Esse padrão reflete o contexto nacional de flutuação das políticas ambientais, com avanços observados nos anos 2000 — marcados por redução do

desmatamento e difusão dos biocombustíveis — e retrocessos posteriores, sobretudo a partir de 2012, associados à expansão da fronteira agrícola e à flexibilização da fiscalização ambiental (IPEA, 2022; SEEG, 2023).

Dessa forma, os resultados obtidos são coerentes com as evidências internacionais e nacionais que apontam para uma CKA incompleta ou de formato “N” nos países em desenvolvimento (Dinda, 2004; Stern, 2017). Em tais economias, o crescimento econômico pode inicialmente gerar ganhos de eficiência e redução das emissões, mas, sem políticas ambientais consistentes e inovação tecnológica contínua, as emissões tendem a retomar a trajetória de alta.

Com o objetivo de avaliar a robustez dos resultados obtidos no modelo quadrático tradicional, foram testadas especificações alternativas da Curva de Kuznets Ambiental (CKA), apresentadas na Tabela 2. Essas estimações complementares permitem verificar se o formato da relação entre renda e emissões se mantém consistente quando se introduzem novos termos funcionais ou transformações logarítmicas das variáveis. Tal procedimento é amplamente recomendado na literatura empírica (Dinda, 2004; Stern, 2017), uma vez que o formato da CKA pode variar conforme a escala dos dados e a forma funcional adotada.

Tabela 2 – Modelos Alternativos de Robustez

Modelo	Variáveis incluídas	Forma da curva	Coeficientes significativos ($p < 0,05$)	Interpretação
Cúbico (N-shape)	PIBpc, PIBpc ² , PIBpc ³	‘N’ instável	$\beta_1 (-)$, $\beta_2 (+)$, $\beta_3 (ns)$	Indício de ‘N’, mas termo cúbico não significativo ($p = 0,41$).
Log-Quadrático	$\ln(\text{PIBpc})$, $[\ln(\text{PIBpc})]^2$	‘U’	$\beta_1 (-)$, $\beta_2 (+)$, ambos $p < 0,01$	Confirma robustez com mesmo formato.

Fonte: Elaboração própria

A Tabela 2 ilustra dois modelos adicionais: o modelo cúbico (N-shape) e o modelo log-quadrático, ambos estimados com os mesmos dados em valores constantes e com erros-padrão robustos. O modelo cúbico incluiu o termo PIBpc³, permitindo capturar possíveis reversões múltiplas na relação entre crescimento e emissões. Os sinais obtidos — $\beta_1 (-)$, $\beta_2 (+)$, $\beta_3 (ns)$, sugerem um formato em “N”

instável, em que as emissões inicialmente diminuem com o aumento da renda, voltam a crescer em níveis intermediários e tenderiam a cair novamente em estágios de renda muito elevados.

Contudo, o coeficiente cúbico (β_3) não foi estatisticamente significativo ($p = 0,41$), o que invalida a confirmação empírica de uma terceira inflexão. Assim, o formato “N” não se sustenta do ponto de vista estatístico, configurando-se apenas como um indício de não linearidade residual. Esse resultado é coerente com estudos como Balsalobre-Lorente et al. (2018) e Fracasso et al. (2023), que observaram padrões semelhantes em economias emergentes, onde a CKA apresenta oscilações, mas raramente múltiplas reversões completas.

De modo geral, o modelo cúbico reforça que, embora existam flutuações na trajetória das emissões, não há evidência robusta de reversões adicionais além do ponto de inflexão único já identificado no modelo quadrático. Em termos econômicos, isso indica que o país ainda se encontra em uma trajetória ascendente de emissões após certo nível de renda, sem ter alcançado a fase de declínio estrutural prevista pela hipótese da CKA em formato “N”.

A segunda especificação aplicou a transformação logarítmica às variáveis de renda, estimando o modelo: $CO2pc = \beta_0 + \beta_1 \ln(PIBpc) + \beta_2 [\ln(PIBpc)]^2 + \varepsilon$. Essa forma funcional é comumente empregada para reduzir a assimetria dos dados e interpretar elasticidades (Grossman & Krueger, 1995; Dinda, 2004). Os coeficientes mantiveram o mesmo padrão de sinais – $\beta_1 (-)$ e $\beta_2 (+)$, ambos significativos a 1% ($p < 0,01$) – confirmando o formato em “U” observado no modelo quadrático.

A consistência dos sinais e da significância estatística demonstra que o resultado principal é robusto à transformação logarítmica, isto é, não depende da escala das variáveis. Essa estabilidade indica que o formato em “U” decorre de um padrão estrutural da economia brasileira e não de distorções de escala ou colinearidade. Em outras palavras, mesmo após controlar pela elasticidade da renda, o crescimento econômico continua associado à redução inicial e ao subsequente aumento das emissões per capita.

Os modelos alternativos confirmam a estabilidade do formato em “U” da Curva de Kuznets Ambiental para o Brasil entre 1995 e 2022. Embora o modelo cúbico indique uma possível oscilação adicional, a ausência de significância do termo de terceira ordem impede validar a existência de múltiplos pontos de reversão.

Já o modelo log-quadrático reforça a consistência dos resultados: a relação não linear entre renda e emissões persiste mesmo após o tratamento logarítmico, indicando que o comportamento da CKA é intrínseco ao padrão de crescimento nacional. Esses achados sustentam a conclusão de que o país ainda não entrou na fase de declínio estrutural das emissões, mantendo-se em um estágio intermediário de transição ambiental (Stern, 2017; IPEA, 2022; SEEG, 2023).

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados deste Trabalho de Conclusão de Curso inferem que o Brasil ainda não alcançou o estágio de desenvolvimento sustentável em que a melhoria ambiental é um resultado automático e duradouro do crescimento da renda. Tal dinâmica é coerente com o contexto de economias emergentes, onde a estrutura produtiva permanece dependente de setores intensivos em recursos naturais, como o agronegócio e o uso da terra.

Este cenário ressalta um imperativo de justiça climática para o Brasil. Como nação em desenvolvimento e signatária do Acordo de Paris, o país assumiu o compromisso de diminuir sua trajetória de emissões de CO₂, a fim de mitigar as mudanças climáticas. O não cumprimento dessa meta, compromete o objetivo de restringir o aumento da temperatura em 1,5°C. Cabe pontuar que os países do Sul Global, como o Brasil, possuem menor disponibilidade de recursos para a adaptação climática e, sendo assim, são afetados de maneira mais acentuada pelas intempéries do aquecimento global, como insegurança alimentar e desastres naturais.

Em última análise, os resultados desta pesquisa reforçam que o desafio brasileiro reside em conciliar o Objetivo de Desenvolvimento Sustentável (ODS) 8 (Crescimento Econômico) com o ODS 13 (Ação contra a Mudança Global do Clima). A transição para um modelo sustentável exige uma ruptura com o padrão de crescimento poluidor, guiada por uma agenda nacional que priorize a sustentabilidade e a equidade socioambiental.

Recomenda-se, para estudos futuros, a replicação da CKA com dados setoriais (Energia, Agropecuária, Uso da Terra e Indústria) e com PIB per capita regionalizado, o que permitiria compreender em que medida a transição ambiental ocorre de forma desigual no território brasileiro.

REFEÊNCIAS

- ALMEIDA, A. N.; CARVALHO, D. S. Crescimento econômico e meio ambiente: uma análise da Curva de Kuznets Ambiental para o Brasil. **Revista de Economia e Sociologia Rural**, Brasília, v. 46, n. 4, p. 909–940, out./dez. 2008.
- ANTWEILER, W.; COPELAND, B. R.; TAYLOR, M. S. **Is free trade good for the environment? The American Economic Review**, v. 91, n. 4, p. 877–908, 2001. Disponível em: <https://www.aeaweb.org/articles?id=10.1257/aer.91.4.877>. Acesso em: 30 mai. 2025.
- ARROW, K. et al. **Economic growth, carrying capacity, and the environment. Ecological Economics**, v. 15, n. 2, p. 91–95, 1995. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/0921-8009\(95\)00059-3](https://doi.org/10.1016/0921-8009(95)00059-3). Acesso em: 28 mai. 2025.
- BALSALOBRE-LORENTE, D. et al. Environmental Kuznets Curve hypothesis and the role of governance in the BRICS countries. **Energy & Environment**, London, v. 29, n. 8, p. 1259–1275, 2018.
- BARROS, A. L. M. de; CAMPOS, C. P.; PEREIRA, G. S. Desigualdade ambiental e economia política do desenvolvimento sustentável. **Revista Brasileira de Políticas Públicas**, Brasília, v. 10, n. 2, p. 1–21, 2020. Disponível em: <https://www.rbps.uniceub.br/rbps/article/view/624>. Acesso em: 2 jun. 2025.
- BECKERMAN, W. Economic growth and the environment: Whose growth? Whose environment? **World Development**, v. 20, n. 4, p. 481–496, 1992. DOI: [https://doi.org/10.1016/0305-750X\(92\)90038-W](https://doi.org/10.1016/0305-750X(92)90038-W).
- BLANCHARD, O. **Macroeconomia**. 5. ed. São Paulo: Pearson, 2011.
- BROWN, B. E. Coral bleaching: causes and consequences. **Coral Reefs**, v. 16, n. 1, p. S129–S138, 1997. DOI: <https://doi.org/10.1007/s003380050249>.
- COPELAND, B. R.; TAYLOR, M. S. **Trade and the environment: A Partial Synthesis. American Journal of Agricultural Economics**, v. 77, n. 3, p. 765–771, 1995.
- COPELAND, B. R.; TAYLOR, M. S. **Trade and the environment: theory and evidence**. Princeton: Princeton University Press, 2004. Disponível em: <https://press.princeton.edu/books/paperback/9780691117580/trade-and-the-environment>. Acesso em: 2 jun. 2025.
- DASGUPTA, S. et al. Confronting the environmental Kuznets curve. **Journal of Economic Perspectives**, v. 16, n. 1, p. 147–168, 2002. DOI: <https://doi.org/10.1257/0895330027157>.
- DINDA, S. **Environmental Kuznets Curve Hypothesis: A Survey. Ecological Economics**, v. 49, n. 4, p. 431–455, 2004. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2004.02.011>.

FERNANDES, C. E. et al. Assessing the Environmental Kuznets Curve in Agricultural Transport: The Case of Brazilian Soy. **Journal of Agricultural and Applied Economics**, Cambridge, v. 53, n. 3, p. 446–460, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1017/aae.2021.4>.

FRACASSO, A. et al. Exploring the environmental Kuznets curve for greenhouse gas emissions across Brazilian states: a multivariate panel data approach. **Environmental Science and Pollution Research**, Cham, v. 30, p. 1–16, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11356-023-25411-z>.

GROSSMAN, G. M.; KRUEGER, A. B. Economic Growth and the Environment. **The Quarterly Journal of Economics**, v. 110, n. 2, p. 353–377, 1995. Disponível em: <https://doi.org/10.2307/2118443>. Acesso em: 3 jun. 2025.

GROSSMAN, G. M.; KRUEGER, A. B. Environmental impacts of a North American Free Trade Agreement. **NBER Working Paper Series**, n. 3914, 1991. Disponível em: <https://www.nber.org/papers/w3914>. Acesso em: 3 jun. 2025.

GROSSMAN, G. M.; KRUEGER, A. B. Economic Growth and the Environment. In: MUNASINGHE, Mohan. **Macroeconomics and the Environment**. UK e USA: Elgar, 2002.

Gujarati, D. N.; Porter, D. C. (2012). **Basic Econometrics**. New Delhi: McGraw Hill.

HUGHES, T. P. et al. Climate change, human impacts, and the resilience of coral reefs. **Science**, v. 301, n. 5635, p. 929–933, 2003. DOI: <https://doi.org/10.1126/science.1085046>.

HUGHES et al. A framework to assess national level vulnerability from the perspective of food security: The case of coral reef fisheries **Environmental Science & Policy**, [S.l.], [S.d.]. Disponível em: https://researchonline.jcu.edu.au/24153/1/Hughes_et_al_2012_Environmental_Science_and_Policy.pdf. Acesso em: 08 maio. 2025.

HUMPHREY, H. B.; STANISLAW, J. The chemical elements of the periodic table. **Energy Policy**, v. 7, n. 2, p. 130–136, 1979.

IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change. Climate Change 2007: Synthesis Report. Genebra: IPCC, 2007. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/report/ar4/syr/>. Acesso em: 1 jun. 2025.

IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change. Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Genebra: IPCC, 2021. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/>. Acesso em: 28 mai. 2025.

IRENA – International Renewable Energy Agency. Renewable Energy Statistics 2020. Abu Dhabi: IRENA, 2020. Disponível em: <https://www.irena.org/Statistics/View-Data-by-Topic/Capacity-and-Generation/Technologies>. Acesso em: 1 jun. 2025.

JUG, J.; MIRZA, D. Environmental Regulations in Gravity Equations: Evidence from Europe. **The World Economy**, v. 28, n. 11, p. 1591–1615, 2005.

KUZNETS, S. Economic growth and income inequality. **The American Economic Review**, v. 45, n. 1, p. 1–28, 1955.

LI, Xing; LIU, Xiaming. Foreign Direct Investment and Economic Growth: An Increasing Endogenous Relationship. **World Development**, v. 33, n. 3, p. 397–407, 2005.

LUCENA, A. F. P. **Estimativa de uma Curva de Kuznets Ambiental aplicada ao uso de energia e suas implicações para as emissões de carbono no Brasil**. – Faculdade de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2005.

MARTINEZ-ALIER, J. **The Environmentalism of the Poor: A Study of Ecological Conflicts and Valuation**. Cheltenham: Edward Elgar, 2002.

MOTTA, R. S. **Economia do meio ambiente**. São Paulo: FGV Editora, 1999.

PANAYOTOU, T. **Economic growth and the environment**. CID Working Paper Series, n. 56. Harvard University, 2000. Disponível em: <https://www.hks.harvard.edu/sites/default/files/centers/cid/files/publications/faculty/wp/056.pdf>. Acesso em: 1 jun. 2025.

PANAYOTOU, T. **Empirical tests and policy analysis of environmental degradation at different stages of economic development**. Working Paper, n. 238, Technology and Employment Programme, International Labour Office, 1993.

PANAYOTOU, T. Economic growth and the environment. In: HENRIQUES, A.; SADORSKY, P. (Org.). **Sustainable development: environment, economy and society**. Cheltenham: Edward Elgar, 2003. p. 47–65.

PEREIRA, A. S.; JUNIOR, J. C. Economia ambiental: desenvolvimento sustentável e crescimento econômico. **Revista de Economia e Sustentabilidade**, v. 2, n. 1, p. 45–62, 2021.

PEREIRA, Arcelo Luis; WESZ JUNIOR, Valdemar João. Crescimento e desenvolvimento: revisão e discussão = Growth and development: review and discussion. **Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais**, [S. l.], v. 11, n. 6, p. 1–14, 2020. Disponível em: https://rima.ufrj.br/jspui/bitstream/20.500.14407/6595/1/Crescimento%20e%20desenvolvimento_revis%c3%a3o%20e%20discuss%c3%a3o.pdf. Acesso em: 26 abr. 2025.

PEREIRA, J. S. Energia, urbanização e meio ambiente. **Revista Brasileira de Energia**, v. 25, n. 2, p. 65–82, 2019.

POTT, A. C.; ESTRELA, A. O. A Revolução Industrial e seus impactos sociais. **Revista Contexto & Educação**, v. 32, n. 103, p. 41–58, 2017.

POTT, C. M.; ESTRELA, C. C. **Histórico ambiental: desastres ambientais e o despertar de um novo pensamento**. Estudos Avançados, v. 31, n. 89, p. 271–283, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1590/s0103-40142017.31890021>.

ROBERTS, J. T.; PARKS, B. C. **A Climate of Injustice: Global Inequality, North-South Politics, and Climate Policy**. Cambridge: MIT Press, 2007.

ROTH, M.; RINDERKNECHT, D. Outsourcing pollution? Evidence from Switzerland's emission accounts. **Environmental Science & Policy**, Amsterdam, v. 106, p. 99–110, 2020.

SACHS, J. D. **The age of sustainable development**. New York: Columbia University Press, 2015. Disponível em: <https://cup.columbia.edu/book/the-age-of-sustainable-development/9780231173148>. Acesso em: 1 jun. 2025.

SEEG – SISTEMA DE ESTIMATIVAS DE EMISSÕES E REMOÇÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA. POTENZA, R. F.; QUINTANA, G. de O.; CARDOSO, A. M.; TSAI, D. S.; CREMER, M. dos S.; SILVA, F. B. e; GRACES, I.; CARVALHO, K.; COLUNA, I.; SHIMBO, J.; SILVA, C.; SOUZA, E.; ZIMBRES, B.; ALENCAR, A.; ANGELO, C.; AZEVEDO, T. GASES DE EFEITO ESTUFA - Observatório do Clima, 2023. Disponível em: <https://www.oc.eco.br/wp-content/uploads/2023/03/SEEG-10-anos-v4.pdf>. Acesso em: 26 abr. 2025.

SILVA, Robson Willians da Costa; PAULA, Beatriz Lima de. **Causa do aquecimento global: antropogênica versus natural**. Terrae Didactica, Campinas, SP, v. 5, n. 1, p. 42–49, 2015. DOI: 10.20396/td.v5i1.8637501. Disponível em: <https://periodicos.sbu.unicamp.br/ojs/index.php/td/article/view/8637501>. Acesso em: 8 maio. 2025.

SILVA, S. A.; PAULA, A. A. Impactos das mudanças climáticas: gases de efeito estufa e a contribuição antrópica. **Revista Ciências Ambientais**, v. 9, n. 2, p. 35–49, 2015.

STERN, D. I. The rise and fall of the environmental Kuznets curve. **World Development**, v. 32, n. 8, p. 1419–1439, 2004. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.worlddev.2004.03.004>. Acesso em: 26 abr. 2025.

STERN, D. I. et al. **Economic growth and environmental degradation: The Environmental Kuznets Curve revisited**. Ecological Economics, Amsterdam, v. 134, p. 265–275, 2017.

VARIAN, H. R. **Microeconomia: princípios básicos**. 5. ed. Rio de Janeiro: Campus, 2000.

WORLD BANK. World Development Indicators 2021. Washington, D.C.: The World Bank, 2021.

WORLD BANK. World Development Report 2021: Data for Better Lives. Washington, DC: World Bank, 2021. Disponível em: <https://www.worldbank.org/en/publication/wdr2021>. Acesso em: 1 jun. 2025.

YANDLE, B.; VIJAY, B.; BHATTACHARYA, R. **Environmental Kuznets Curve: A Primer**. **Property and Environment Research Center (PERC)**, 2002.

ZHAO, M. et al. Testing the Environmental Kuznets Curve across income groups using time-series data: global evidence from 182 countries. **Environment, Development and Sustainability, Cham**, v. 26, p. 1–22, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10668-024-04890-1>.