

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA – UNESP
FACULDADE DE ENGENHARIA DE BAURU – FEB
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE
PRODUÇÃO**

DANILO MARQUES DE LIMA

**DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO E QUALIDADE AMBIENTAL:
CONEXÕES ENTRE COMPLEXIDADE ECONÔMICA, CURVA
AMBIENTAL DE KUZNETS E POLÍTICAS PÚBLICAS**

**Bauru
2026**

DANILO MARQUES DE LIMA

**DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO E QUALIDADE
AMBIENTAL: CONEXÕES ENTRE COMPLEXIDADE
ECONÔMICA, CURVA AMBIENTAL DE KUZNETS E
POLÍTICAS PÚBLICAS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia de Produção, da Faculdade de Engenharia de Bauru - da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” (UNESP), campus de Bauru, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre.

Orientador: Prof. Dr. Diogo Ferraz

**Bauru
2026**

L732d

Lima, Danilo Marques de

Desenvolvimento econômico e qualidade ambiental: conexões entre complexidade econômica, Curva Ambiental de Kuznets e políticas públicas / Danilo Marques de Lima. -- Bauru, 2026

122 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Engenharia, Bauru

Orientador: Diogo Ferraz

1. Desenvolvimento sustentável. 2. Complexidade econômica. 3. Emissões de CO2. 4. Curva Ambiental de Kuznets. 5. Políticas públicas. I. Título.

ATA DA DEFESA PÚBLICA DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO DE DANILO MARQUES DE LIMA, DISCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, DA FACULDADE DE ENGENHARIA - CÂMPUS DE BAURU.

Aos 19 de março de 2026, às 16h, por meio de Videoconferência, realizou-se a defesa de DISSERTAÇÃO DE MESTRADO de DANILO MARQUES DE LIMA, intitulada "DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO E QUALIDADE AMBIENTAL: CONEXÕES ENTRE COMPLEXIDADE ECONÔMICA, CURVA AMBIENTAL DE KUZNETS E POLÍTICAS PÚBLICAS". A Comissão Examinadora foi constituída pelos seguintes membros: Prof. Dr. DIOGO FERRAZ (Orientador(a) - Participação Virtual) do(a) Departamento de Engenharia Química e Produção / Universidade de São Paulo - USP, Prof. Dr. EDUARDO POLLONI SILVA (Participação Virtual) do(a) Engenharia de Produção / Universidade Federal de Mato Grosso do Sul - UFMS, Prof. Dr. ENZO BARBERIO MARIANO (Participação Virtual) do(a) Departamento de Engenharia de Produção / UNESP / Câmpus de Bauru - FEB, Após a exposição pelo mestrando e arguição pelos membros da Comissão Examinadora que participaram do ato, de forma presencial e/ou virtual, o discente recebeu o conceito final: APROVADO . Nada mais havendo, foi lavrada a presente ata, que após lida e aprovada, foi assinada pelo(a) Presidente(a) da Comissão Examinadora.

Documento assinado digitalmente
 **DIOGO FERRAZ**
Data: 19/03/2026 16:54:38-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. DIOGO FERRAZ

RESUMO

A relação entre crescimento econômico e degradação ambiental tem sido amplamente investigada pela literatura por meio da teoria da Curva Ambiental de Kuznets (EKC). No entanto, ainda são escassos os estudos que integram a EKC com variáveis estruturais e institucionais. Esta dissertação busca preencher essa lacuna ao analisar o nexo entre complexidade econômica e qualidade ambiental, bem como o papel de políticas públicas combinadas para mitigar as emissões poluentes. Para tanto, a dissertação é composta por dois artigos. O primeiro realiza uma revisão sistemática e análise bibliométrica da literatura sobre EKC e estrutura produtiva entre 2017 e 2024. Os resultados indicam que, embora a hipótese EKC seja frequentemente validada, persistem padrões alternativos e lacunas regionais, especialmente na África e na América Latina. Além disso, observou-se um aumento significativo no uso do ECI nas análises da EKC, o que revela a importância dessa dimensão na pesquisa. Os dados indicam também importantes lacunas e oportunidades de pesquisas futuras, como a escassez de estudos que considerem dimensões sociais, variáveis de políticas industriais, tecnológicas, financeiras e institucionais. O segundo artigo testa empiricamente, por meio de um modelo de painel com correção robusta de Driscoll-Kraay, os efeitos da complexidade econômica e de políticas públicas combinadas de desenvolvimento financeiro e inovação tecnológica sobre emissões poluentes. Utilizando dados de 104 países entre 2000 e 2021. Os resultados confirmam a validade da EKC e mostram que, enquanto o desenvolvimento financeiro e a tecnologia, isoladamente, tendem a aumentar as emissões, sua interação apresenta efeito mitigador. Além disso, variáveis como o ECI, a qualidade regulatória e a energia renovável mostraram impactos significativos na redução das emissões. Dessa forma, esta dissertação avança na literatura ao integrar abordagens bibliométricas e econométricas, fornecendo subsídios teóricos e empíricos para a formulação de políticas públicas estruturadas que promovam um crescimento ambientalmente sustentável.

Palavras-Chave: Desenvolvimento Sustentável, Complexidade Econômica, Emissões de CO_2 , Curva Ambiental de Kuznets, Políticas Públicas.

ABSTRACT

The relationship between economic growth and environmental degradation has been widely examined in the literature through the Environmental Kuznets Curve (EKC) framework. However, studies integrating the EKC with structural and institutional variables remain limited. This dissertation seeks to address this gap by analyzing the nexus between economic complexity and environmental quality, as well as the role of combined public policies in mitigating pollutant emissions. To this end, the dissertation consists of two articles. The first conducts a systematic literature review and bibliometric analysis of studies on the EKC and productive structure published between 2017 and 2024. The results indicate that, although the EKC hypothesis is frequently validated, alternative patterns and regional gaps persist, particularly in Africa and Latin America. Moreover, a significant increase in the use of the Economic Complexity Index (ECI) in EKC analyses highlights the growing relevance of this dimension in the field. The findings also reveal important research gaps and future opportunities, including the limited consideration of social dimensions and industrial, technological, financial, and institutional policy variables. The second article empirically tests, using a panel data model with Driscoll–Kraay robust standard errors, the effects of economic complexity and combined public policies in financial development and technological innovation on pollutant emissions, employing data from 104 countries between 2000 and 2021. The results confirm the validity of the EKC and show that, while financial development and technology individually tend to increase emissions, their interaction has a mitigating effect. Additionally, variables such as the ECI, regulatory quality, and renewable energy show significant impacts on emission reduction. Thus, this dissertation advances the literature by integrating bibliometric and econometric approaches, providing theoretical and empirical support for structured public policies aimed at promoting environmentally sustainable growth.

Keywords: Sustainable Development, Economic Complexity, CO_2 emissions, Environmental Kuznets Curve, Public Policies.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Diagrama Conceitual dos Artigos da Dissertação	16
Figura 2 - Curva Ambiental de Kuznets (EKC)	21
Figura 3 - Palavras-chave utilizadas na pesquisa	24
Figura 4 - Protocolo PRISMA	25
Figura 5 - Produção científica anual.....	26
Figura 6 - Produção científica anual por periódico	28
Figura 7 - Top 10 autores que mais publicaram	29
Figura 8 - Publicações e citações ao longo do tempo.....	30
Figura 9 - Rede de Palavras-chave	31
Figura 10 - Utilização de termos ao longo do tempo	31
Figura 11 - Publicação de artigos com base na nacionalidade	32
Figura 12 - Colaboração Inter-País (MCP)	33
Figura 13 - Rede de citações entre autores	33
Figura 14 - Variáveis dependentes utilizadas	43
Figura 15 - Variáveis independentes mais utilizadas	44
Figura 16 - Áreas geográficas analisadas	45
Figura 17 - Análises de países específicos	46
Figura 18 - Blocos econômicos analisados.....	47
Figura 19 - Métodos utilizados.....	48
Figura 20 - Validação da hipótese EKC	49
Figura 21 - Variável de análise EKC.....	50
Figura 22 - Matrizes de correlação	73

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- RSL abordando Curva Ambiental de Kuznets e Complexidade Econômica	23
Tabela 2 - Lacunas de pesquisa	52
Tabela 3 - Variáveis do modelo.....	70
Tabela 4 - Estatística descritiva	72
Tabela 5 - Teste de Hausman	81
Tabela 6 - Teste de Pesaran (CSD).....	82
Tabela 7 - Teste de Dickey Fuller Aumentado (ADF)	82
Tabela 8 - Teste de Breusch-Pagan	82
Tabela 9 - Teste de Wooldridge	83
Tabela 10 - Teste VIF	83
Tabela 11 - Resultados de regressão dos modelos para emissões de CO ₂	84
Tabela 12 – Resultados de regressão dos modelos para emissões de GEE.....	85
Tabela 13 - Resultados de regressão do Cluster 1	91
Tabela 14 - Resultados de regressão do Cluster 2	92
Tabela 15 - Resultados de regressão do Cluster 3	93

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ARDL – Autoregressive Distributed Lag

BRICS - Brasil, Rússia, Índia, China e África do Sul

CO₂ – Dióxido de Carbono

DOLS – Dynamic Ordinary Least Squares

ECI – Índice de Complexidade Econômica (*Economic Complexity Index*)

EKC – Curva Ambiental de Kuznets (*Environmental Kuznets Curve*)

FMOLS – Fully Modified Ordinary Least Squares

GHG – Gases de Efeito Estufa (*Green House Gases*)

GDP – Produto Interno Bruto (*Gross Domestic Product*)

IED – Investimento Externo Direto

MENA – Oriente Médio e Norte da África (*Middle East and North Africa*)

MINT - México, Indonésia, Nigéria e Turquia

ODS – Objetivos de Desenvolvimento Sustentável

PIB – Produto Interno Bruto

PRISMA – Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses

RSL – Revisão Sistemática da Literatura

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	12
1.1. QUESTÃO E OBJETIVO DE PESQUISA	15
1.2. ESTRUTURA DA TESE	15
1.2.1. <i>Síntese dos Artigos</i>	15
1.2.2. <i>Relação entre os Artigos</i>	18
2. ARTIGO 1: O NEXO ENTRE CURVA AMBIENTAL DE KUZNETS E COMPLEXIDADE ECONÔMICA: UMA REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA	20
2.1. INTRODUÇÃO	20
2.2. METODO E DADOS	24
2.3. RESULTADOS.....	26
2.3.1. <i>Análise Bibliométrica</i>	26
2.3.2. <i>Análise da Rede de Citações</i>	33
2.3.3. <i>Vertentes Teóricas</i>	39
2.3.4. <i>Estratégias de Pesquisa</i>	42
2.3.5. <i>Análise dos Resultados</i>	50
2.4. CONSIDERAÇÕES FINAIS	53
3. ARTIGO 2: DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL E POLÍTICAS PÚBLICAS COMBINADAS: UMA ANÁLISE DA COMPLEXIDADE ECONÔMICA, INOVAÇÃO E FINANÇAS SOB A ÓTICA DA CURVA AMBIENTAL DE KUZNETS	55
3.1. INTRODUÇÃO	55
3.2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	58
3.2.1. <i>Relação entre Crescimento Econômico e Meio Ambiente</i>	58
3.2.2. <i>Complexidade Econômica e Degradação Ambiental</i>	60
3.2.3. <i>Inovações Tecnológicas e Impactos Ambientais</i>	62
3.2.4. <i>Consumo de Energia e Meio Ambiente</i>	64
3.2.5. <i>Qualidade Regulatória e Impactos ao Meio Ambiente</i>	66
3.2.6. <i>Desenvolvimento Financeiro e Qualidade Ambiental</i>	68
3.3. MÉTODO E DADOS	70
3.3.1. <i>Variáveis e Estatística Descritiva</i>	70
3.3.2. <i>Teste de Hausman</i>	74
3.3.3. <i>Teste de Dependência de Corte Transversal (CSD)</i>	75
3.3.4. <i>Teste de Raiz Unitária</i>	75
3.3.5. <i>Teste de Breusch-Pagan</i>	76

3.3.6. <i>Teste de Wooldridge</i>	77
3.3.7. <i>Teste de Fator de Inflação da Variância (VIF)</i>	77
3.3.8. <i>Clusterização por K-Means</i>	78
3.3.9. <i>Modelos Econométricos</i>	79
3.4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	81
3.4.1. <i>Resultados dos Testes</i>	81
3.4.2. <i>Resultados Econométricos</i>	83
3.4.3. <i>Discussão e Implicações Políticas</i>	95
3.5. CONSIDERAÇÕES FINAIS	99
4. CONSIDERAÇÕES FINAIS DA DISSERTAÇÃO.....	101
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	104
APÊNDICE A – Lista completa dos 104 países da amostra	118
APÊNDICE B – Lista de países por cluster.....	121
Cluster 1: Economias Avançadas e Complexas	121
Cluster 2: Economias Intermediárias	122
Cluster 3: Economias de Baixa Complexidade e Capacidade Estrutural.....	123

1. INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, os efeitos das atividades humanas sobre o meio ambiente têm se intensificado de maneira alarmante (Edo et al., 2024; Soni, 2023). A expansão industrial, o aumento do consumo de combustíveis fósseis e o desmatamento em larga escala resultaram em profundas transformações nos ecossistemas e no equilíbrio climático global (Ahuti, 2015). De acordo com o Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC, 2023), há evidências científicas robustas de que a ação antrópica é a principal responsável pelo aumento da temperatura média do planeta desde meados do século XX, promovendo eventos climáticos extremos, elevação do nível do mar e perda de biodiversidade. O homem, ao perseguir incessantemente o crescimento econômico, tem contribuído significativamente para a degradação ambiental, criando uma tensão entre desenvolvimento e sustentabilidade (Rockstrom et al., 2009).

As mudanças climáticas se tornaram um dos maiores desafios contemporâneos, com impactos que transcendem as fronteiras nacionais e afetam todas as dimensões da vida humana, desde a segurança alimentar até a saúde pública e a estabilidade econômica (Adger, 2022). Nesse contexto, torna-se crucial compreender como as trajetórias de desenvolvimento econômico se relacionam com os indicadores ambientais. Diversos estudos buscam compreender essa relação, e entre os principais marcos teóricos nesse debate se destaca a Curva Ambiental de Kuznets (Environmental Kuznets Curve – EKC). Essa teoria propõe a existência de um padrão não linear entre renda e impacto ambiental, sugerindo uma relação em formato de U invertido entre crescimento econômico e degradação ambiental. Formulada por Grossman e Krueger (1995), essa abordagem se baseia na clássica Curva de Kuznets sobre desigualdade (Kuznets, 1955) e tem ganhado destaque na literatura voltada ao desenvolvimento sustentável.

Embora a EKC tenha sido amplamente investigada nas últimas décadas, os resultados empíricos ainda são contraditórios, com diferentes formas funcionais, variáveis e contextos geográficos influenciando os achados (Dinda, 2004; Stern, 2017; Balsalobre-Lorente et al., 2022; Adebayo et al., 2022; Dogan et al., 2022). Além disso, observa-se que a teoria tradicional da EKC não incorpora fatores estruturais e institucionais que têm apresentado grande influência sobre a trajetória do desenvolvimento sustentável (Tang et al., 2021; Xaisongkham e Liu, 2022). É nesse ponto que a literatura recente tem buscado incorporar novas dimensões explicativas, como o papel da sofisticação da estrutura produtiva e da complexidade econômica no processo de transição para padrões mais sustentáveis de crescimento.

O conceito de Complexidade Econômica, desenvolvido por Hausmann e Hidalgo

(2011), está relacionado à capacidade dos países de produzir e exportar produtos sofisticados e diversificados, com base em conhecimento tácito e redes produtivas complexas. Dois elementos centrais compõem esse conceito: a diversificação e a ubiquidade. A diversificação refere-se à variedade de produtos que um país é capaz de produzir e exportar com vantagem comparativa, de modo que economias diversificadas tendem a ter um portfólio produtivo mais amplo e menos dependente de poucos setores, aumentando sua resiliência econômica (Hausmann et al., 2013). A ubiquidade indica a quantidade de países que conseguem produzir determinado bem; bens menos ubíquos, como semicondutores avançados ou equipamentos médicos de alta precisão, exigem capacidades tecnológicas e institucionais mais complexas, enquanto bens ubíquos, como commodities agrícolas ou minerais brutos, demandam menor sofisticação tecnológica (Hidalgo e Hausmann, 2009). Nesse sentido, países como o Japão e a Alemanha apresentam alta complexidade econômica, dada a ampla diversificação e produção de bens pouco ubíquos, como automóveis de alta engenharia, máquinas industriais especializadas e equipamentos eletrônicos sofisticados, enquanto economias dependentes de recursos naturais, como o Brasil ou a Venezuela, exibem baixa complexidade com maior concentração em produtos como soja, minério de ferro e petróleo bruto (OEC, 2024).

A literatura evidencia que maiores níveis de complexidade econômica tendem a favorecer o desenvolvimento sustentável, através da ampliação das capacidades produtivas voltadas a setores de alto valor agregado e menor impacto ambiental (Mealy e Teytelboym, 2020). Esse efeito positivo sobre o desenvolvimento sustentável pode ser explicado pela capacidade dessas economias de fomentar inovações tecnológicas que reduzem a degradação ambiental proveniente das atividades produtivas (Stojkoski et al., 2022). Economias mais complexas tendem a possuir infraestrutura científica e industrial capaz de produzir e difundir tecnologias limpas, como painéis solares de alta eficiência, veículos elétricos, eletrodomésticos com baixo consumo energético e sistemas avançados de reciclagem (Mealy & Teytelboym, 2020; Caldarola et al., 2024). Esse processo ocorre porque o acúmulo de capacidades produtivas intensivas em conhecimento facilita a transição para matrizes energéticas renováveis e práticas produtivas menos intensivas em carbono (Hirsch e Ribes, 2021). No entanto, embora a complexidade possa direcionar a estrutura produtiva para setores ambientalmente mais sustentáveis, sua eficácia depende de um ambiente institucional propício, de políticas públicas complementares, e de um sistema financeiro robusto, que é fundamental para viabilizar investimentos em inovação, facilitar o acesso a capital para tecnologias limpas e apoiar a expansão de inovações sustentáveis, acelerando assim a transformação econômica necessária para um desenvolvimento sustentável (Abid et al., 2022; Akhtar e Rashid, 2024).

Outro aspecto essencial se refere ao papel das políticas públicas e da intervenção do Estado na promoção da sustentabilidade. O desenho institucional, a eficiência governamental e as regulações institucionais são essenciais na mediação dos efeitos do crescimento sobre o meio ambiente (Ibrahim e Law, 2016; L. K. Chu, 2021). A literatura aponta que mesmo países com elevada complexidade produtiva podem enfrentar problemas ambientais na ausência de uma governança eficaz (Barbier, 2011). Nesse contexto, políticas de sofisticação produtiva alinhadas aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) podem fomentar setores estratégicos, incentivar práticas produtivas sustentáveis e garantir que os benefícios do crescimento sejam distribuídos com equidade e responsabilidade ecológica.

A atuação do Estado, portanto, é crucial para fomentar inovações ambientais, gerando mudanças estruturais significativas e induzindo a sustentabilidade (Afolabi, 2023). A integração entre política de sofisticação produtiva, planejamento ambiental e estratégias de desenvolvimento regional cria trajetórias de crescimento que respeitem os limites planetários, promovendo inclusão social e qualidade de vida (Yulek, 2017). Ainda assim, é preciso compreender melhor como essas dinâmicas se manifestam empiricamente e quais são os condicionantes estruturais que influenciam os padrões de degradação nos diferentes países do mundo.

Dessa forma, a pesquisa proposta nesta dissertação incorpora a teoria da Complexidade Econômica, a teoria da Curva Ambiental de Kuznets e a importância de variáveis institucionais e econômicas, como o desenvolvimento financeiro, inovação tecnológica e qualidade regulatória. O estudo está organizado em dois artigos: o primeiro realiza uma revisão sistemática e análise bibliométrica da literatura recente sobre EKC e estrutura produtiva entre os anos de 2017 e 2024, mapeando os principais autores, abordagens metodológicas, lacunas e tendências da área. O segundo artigo adota uma estratégia empírica, aplicando modelos de painel com correção robusta de Driscoll-Kraay para estimar os efeitos da complexidade econômica e de políticas públicas combinadas sobre emissões poluentes, utilizando uma amostra de 104 países no período de 1990 a 2021.

Além de contribuir para a literatura ao integrar variáveis estruturais e institucionais em uma abordagem fundamentada na teoria da Curva Ambiental de Kuznets, esta dissertação busca ampliar o entendimento sobre desenvolvimento sustentável ao propor uma análise aprofundada do papel da sofisticação produtiva e do ambiente institucional na mitigação da degradação ambiental (Zou e Punjwani, 2025; Vu, 2022; Yuan et al., 2025). A investigação do impacto de políticas públicas combinadas sobre a trajetória das emissões poluentes permite avançar na compreensão dos mecanismos institucionais que mediam a relação entre crescimento

econômico, estrutura produtiva e meio ambiente (Wang et al., 2020; Pasco e Bendezu, 2016; Anser et al., 2021). Adicionalmente, a inclusão da qualidade regulatória como variável explicativa permite avançar na compreensão do papel do ambiente institucional na mediação entre crescimento econômico e impacto ambiental (Ibrahim e Law, 2016; Padhan et al., 2023). Nesse sentido, o enfoque multidimensional adotado visa oferecer subsídios para a elaboração de políticas mais eficazes e alinhadas à sustentabilidade (Mealy e Teytelboym, 2020; Hausmann et al., 2013; Teodorescu, 2015). Espera-se, assim, não apenas aprofundar o debate teórico em torno da EKC, mas também contribuir para a formulação de estratégias integradas que promovam trajetórias de desenvolvimento mais justas, resilientes e ambientalmente responsáveis.

1.1. QUESTÃO E OBJETIVO DE PESQUISA

A presente pesquisa é orientada pela seguinte questão central: Qual é o papel da estrutura produtiva, da ação institucional e das políticas públicas combinadas na mitigação da degradação ambiental?

Diante da questão apresentada, o objetivo geral da dissertação consiste em avaliar os efeitos da complexidade econômica, da qualidade institucional e de políticas públicas combinadas sobre as emissões poluentes a partir do arcabouço teórico da Curva Ambiental de Kuznets.

Com base nesse objetivo geral, os seguintes objetivos específicos (OE) foram desenvolvidos por meio de dois artigos científicos:

- OE 1: Mapear o estado da arte da relação entre a teoria EKC, a complexidade econômica e a estrutura produtiva (Artigo 1).
- OE 2: Testar empiricamente, por meio de um modelo de dados em painel com correção robusta, o efeito da complexidade econômica e de políticas públicas combinadas sobre as emissões poluentes em uma amostra de 104 países entre 2000 e 2021 (Artigo 2).

1.2. ESTRUTURA DA TESE

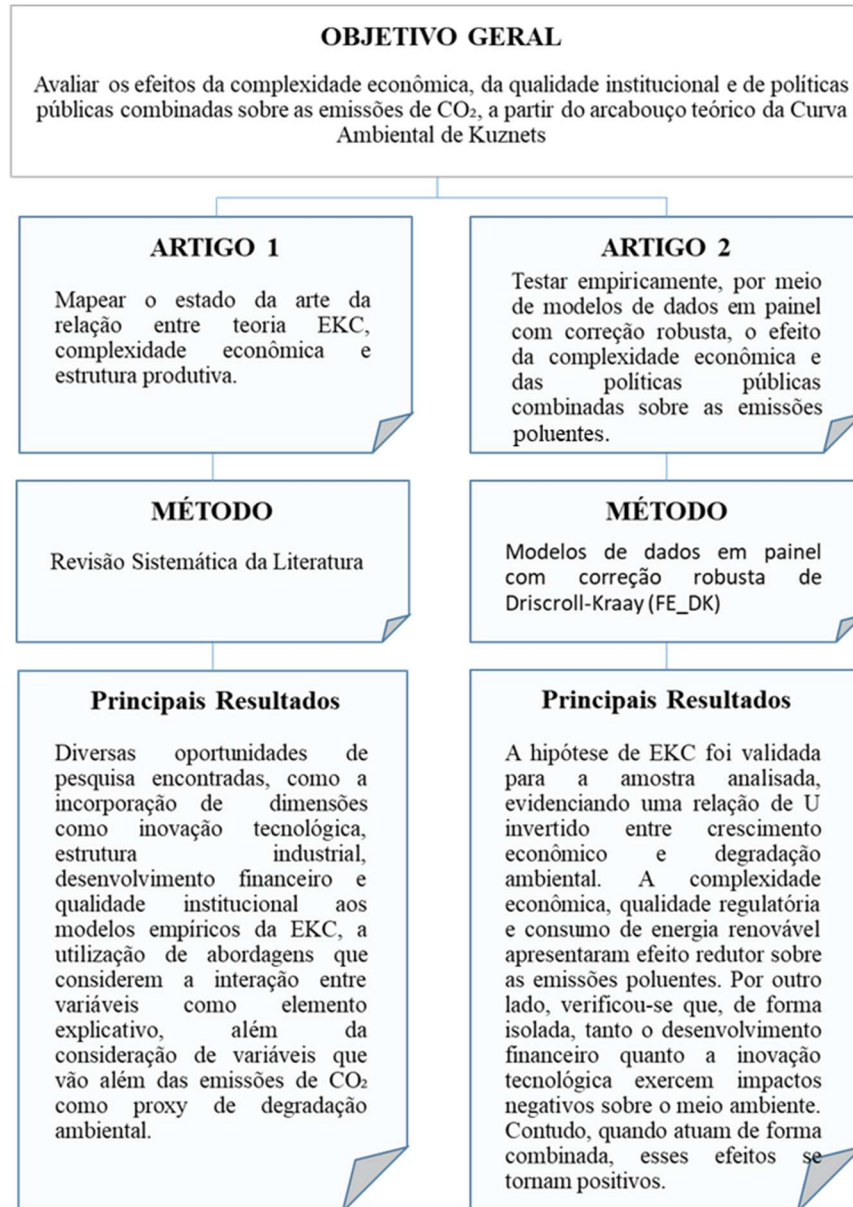
Esta seção apresenta os artigos que compõem essa dissertação e evidencia como eles se relacionam e contribuem para o objetivo geral da pesquisa.

1.2.1. Síntese dos Artigos

A Figura 1 apresenta o diagrama conceitual da dissertação, evidenciando como os

artigos se integram como objetivos específicos para alcançar o objetivo geral da pesquisa. Em seguida, são apresentados breves resumos de cada um dos artigos que compõem o trabalho

Figura 1 - Diagrama Conceitual dos Artigos da Dissertação



Fonte: Elaborado pelo autor

Resumo do artigo 1

A teoria da Curva Ambiental de Kuznets tem se desenvolvido substancialmente nos últimos anos, com pesquisadores integrando diversos indicadores ambientais e variáveis econômicas para explorar a relação entre crescimento econômico e degradação ambiental. Neste contexto, este estudo realizou uma revisão sistemática da literatura e uma análise bibliométrica com o objetivo de investigar a integração entre a hipótese da EKC e a

Complexidade Econômica. Com base na base de dados Web of Science, foram identificados 80 artigos que analisam a relação entre crescimento econômico, estrutura produtiva e degradação ambiental. Os resultados revelam uma rápida expansão das publicações sobre o tema a partir de 2017, com destaque para o periódico *Environmental Science and Pollution Research*. A análise da rede de citações permitiu a identificação de quatro clusters principais: (i) análises por blocos econômicos; (ii) estudos sobre qualidade e diversificação das exportações; (iii) investigações que utilizam o Índice de Complexidade Econômica para validar a EKC; e (iv) abordagens tradicionais baseadas no Produto Interno Bruto. A maioria dos estudos (69%) confirmou a validade da hipótese EKC, embora também tenham sido observados padrões alternativos, como relações em formato de “N”. A pesquisa evidencia a crescente relevância da complexidade econômica como variável explicativa dos impactos ambientais e aponta lacunas importantes na literatura. Destacam-se a escassez de estudos voltados a regiões subexploradas, como África e América Latina; a limitação na utilização de indicadores ambientais compostos; e a predominância do CO₂ como proxy da degradação ambiental, em detrimento de outras variáveis mais abrangentes. Além disso, observa-se a escassez de artigos que incorporem dimensões como inovação tecnológica, estrutura industrial, desenvolvimento financeiro e qualidade institucional nos modelos empíricos da EKC, bem como a carência de estudos que considerem as interações entre variáveis como elementos explicativos. Os achados contribuem para o avanço teórico da EKC ao propor uma agenda de pesquisa multidimensional, que considera as transformações estruturais das economias e seus efeitos sobre o meio ambiente.

Resumo do artigo 2

A mitigação dos danos ambientais, por meio da redução das emissões poluentes, tem sido uma prioridade em acordos e políticas internacionais voltadas à sustentabilidade. Nesse contexto, este artigo investiga os efeitos de políticas públicas que integrem o desenvolvimento financeiro e as inovações tecnológicas sobre as emissões poluentes, incorporando também o papel da complexidade econômica no arcabouço teórico da Curva Ambiental de Kuznets. O estudo parte do pressuposto de que, para promover um crescimento ambientalmente sustentável, é necessário compreender a interação entre variáveis econômicas estruturais, institucionais e tecnológicas. Para isso, utilizou-se um painel de dados de 104 países no período de 2000 a 2021, e aplicou-se um modelo econométrico com correção de Driscoll-Kraay, adequado para lidar com problemas de autocorrelação, heterocedasticidade e dependência entre seções cruzadas. Os resultados empíricos confirmam a validade da hipótese EKC, segundo a qual, nos estágios iniciais de desenvolvimento econômico, o aumento da renda per capita está

associado a maiores emissões poluentes, mas a partir de determinado nível de renda, esse padrão se inverte. Observou-se ainda que, embora o desenvolvimento financeiro e a inovação tecnológica isoladamente contribuam para o aumento das emissões, a interação entre ambas exerce um efeito mitigador. Adicionalmente, constatou-se que o aumento da complexidade econômica, da participação de fontes renováveis na matriz energética e da qualidade regulatória está associado à redução das emissões. Esses achados evidenciam a importância de políticas públicas integradas, capazes de orientar o progresso tecnológico e financeiro para práticas produtivas mais limpas, contribuindo para conciliar crescimento econômico com preservação ambiental.

1.2.2. Relação entre os Artigos

Esta seção discute a articulação entre os artigos que compõem a dissertação, destacando de que forma cada trabalho contribui para o desenvolvimento do seguinte e como, em conjunto, respondem à questão central da pesquisa. A partir da revisão sistemática da literatura apresentada no Artigo 1, que mapeou o estado da arte sobre a integração entre a teoria EKC, a complexidade econômica e a estrutura produtiva, identificaram-se importantes lacunas e oportunidades de pesquisa que orientaram a elaboração do artigo subsequente. Entre as principais lacunas de pesquisa identificadas, destacam-se:

1. Baixa presença de variáveis tecnológicas e financeiras no arcabouço da EKC;
2. Poucas análises que realizem interações entre variáveis explicativas;
3. Escassez de estudos que investiguem políticas públicas combinadas;
4. Poucos estudos utilizam variáveis institucionais.

A partir disso, o Artigo 2 foi estruturado para investigar, de forma mais aprofundada, as lacunas identificadas na literatura, incorporando variáveis tecnológicas, financeiras e institucionais ao modelo da Curva Ambiental de Kuznets. Em especial, o estudo busca preencher: (i) a escassez de proxies alternativas às emissões de CO₂ e a limitada utilização de indicadores compostos de degradação ambiental (lacunas 3 e 6); (ii) a escassez de análises sobre o papel da tecnologia, da estrutura industrial e do desenvolvimento financeiro, bem como a limitada exploração das interações entre variáveis explicativas e da influência das instituições (lacunas 5, 8 e 9); e (iii) a carência de estudos comparativos entre economias desenvolvidas e em desenvolvimento (lacuna 10). Dessa forma, o artigo avança rumo a análises mais abrangentes e interativas, contribuindo para um entendimento mais realista e complexo da dinâmica entre crescimento econômico, estrutura produtiva e sustentabilidade ambiental.

Dessa maneira, considera-se que as pesquisas realizadas ao longo desta dissertação

respondem a pergunta de pesquisa e cumprem o objetivo proposto nesta dissertação. Assim, os capítulos que compõem as próximas partes desta tese estão organizados da seguinte forma:

- A. Os Capítulos 2 e 3 reúnem os artigos que integram esta dissertação, contendo suas respectivas introduções, metodologias, resultados, implicações políticas e considerações finais.
- B. O Capítulo 4 apresenta as considerações finais do trabalho, nas quais são destacados os principais achados empíricos, discutidas as implicações dos resultados obtidos, bem como indicadas as limitações do estudo e sugestões para pesquisas futuras.
- C. Por fim, as referências utilizadas ao longo da pesquisa são reunidas em um capítulo único.

2. ARTIGO 1: O NEXO ENTRE CURVA AMBIENTAL DE KUZNETS E COMPLEXIDADE ECONÔMICA: UMA REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA

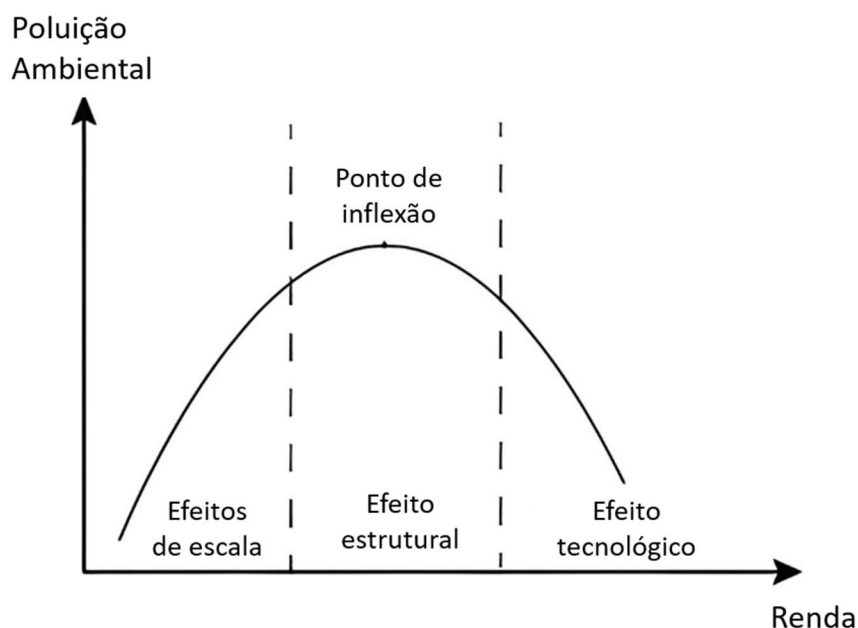
2.1. INTRODUÇÃO

As mudanças climáticas e os efeitos do aquecimento global vêm se destacando como os principais problemas do mundo moderno. Isto se relaciona intrinsecamente ao nível de degradação ambiental registrado no mundo (Can e Gozcor, 2017). Organizações internacionais, como as Nações Unidas, indicam que a degradação ambiental se caracteriza como a principal causa do aquecimento global (Ahmed et al. 2023). Nota-se que a deterioração ambiental tem crescido ao longo dos anos e tem se tornado um dos principais vetores das mudanças climáticas. Dessa forma, os formuladores de políticas e pesquisadores estão engajados no objetivo de investigar os principais fatores que afetam a qualidade ambiental (Qian e Madni, 2022).

Estudos recentes apontam que o aquecimento global constitui o principal *driver* das mudanças climáticas, sendo principalmente afetado pelas emissões de gases do efeito estufa (Fang et al., 2019). Nota-se que desde o início da Revolução Industrial, as concentrações atmosféricas de dióxido de carbono, o principal gás de efeito estufa, aumentaram cerca de 35%, com aumento mais acentuado a partir de 1945 (Baumert et al., 2005). Nos últimos dois séculos, foram lançadas na atmosfera mais de 2,3 toneladas de CO_2 decorrente das atividades humanas (Baumert et al., 2005). Segundo Dogan et al. (2019), os esforços para o crescimento econômico dos países são a principal causa deste problema.

Nas últimas décadas, estudos abordando a relação entre crescimento econômico e degradação ambiental têm ganhado notoriedade, sendo amplamente investigados por pesquisadores de todo o mundo (Lau et al., 2023). Nesse contexto, a hipótese da Curva Ambiental de Kuznets emerge como uma técnica pertinente, pois analisa o nexo entre economia e meio ambiente. A hipótese da EKC, desenvolvida por Grossman e Krueger (1991), contribui para a literatura do desenvolvimento sustentável, demonstrando uma relação não linear entre o crescimento econômico e a degradação ambiental. De acordo com esta teoria, à medida que as economias crescem, a degradação ambiental aumenta gradativamente até atingir um ponto específico e, a partir desse ponto, verifica-se redução da degradação ambiental.

Figura 2 - Curva Ambiental de Kuznets (EKC)



Fonte: Grossman e Kruegger (1991)

Mais especificamente, a hipótese da EKC sugere que a degradação ambiental aumenta até determinado nível de renda e, a partir deste ponto, espera-se que a degradação ambiental diminua, ao passo que se registra aumento de renda. Este aspecto, ilustrado na Figura 2, se caracteriza por uma interação de “U invertido” entre renda e degradação ambiental (Can e Gozcor, 2017). Nota-se que nos primeiros períodos de desenvolvimento econômico, os países tendem a se concentrar no setor de agricultura extensiva, que pouco contribui para a poluição ambiental (Kearsley e Riddel, 2010). Posteriormente, os países passam para o estágio de industrialização, aumentando os níveis de poluição. Nesse estágio, os países direcionam as indústrias para uma produção baseada em conhecimento e habilidade, isto é, uma produção mais sofisticada. Nesse contexto, identifica-se uma mudança estrutural, na qual tende a reduzir a degradação ambiental. Em outros termos, esse estágio exibe um processo de aumento no nível de qualidade ambiental, pois, no processo de mudança estrutural, as novas tecnologias implementadas tendem a emitir menos poluição quando substituem as velhas tecnologias usadas na manufatura (Can e Gozcor, 2017).

Devido à intrínseca e complexa relação entre deterioração ambiental e atividades econômicas, uma variedade de estudos tem se dedicado a investigar esse efeito utilizando diversas variáveis econômicas e ambientais (Ikram et al., 2021). Muitos países têm interpretado o Produto Interno Bruto (PIB) como um indicador de progresso e desenvolvimento econômico. No entanto, Hidalgo (2011) argumenta que a abordagem tradicional de produção agregada não

é satisfatória para a explicação do crescimento econômico e do desenvolvimento de um país. Ikram et al. (2021) acrescentam que o PIB é uma métrica importante, porém não incorpora efetivamente outras dimensões da economia, como o progresso tecnológico. Nesse contexto, Hidalgo e Hausmann (2009) identificaram que a estrutura produtiva e a complexidade econômica de um país são importantes condicionantes de crescimento econômico. A complexidade de uma economia pode ser mensurada pelo Índice de Complexidade Econômica (ECI). Desenvolvido por Hidalgo e Hausmann (2009), este índice se baseia na cesta de exportação de um país visando evidenciar as características e as capacidades produtivas de uma economia. Em suma, o ECI refere-se à diversidade e sofisticação das exportações de um país, refletindo sua capacidade de produzir bens e serviços com alto valor agregado e complexidade tecnológica.

Apesar da existência de uma extensa literatura analisando tanto a hipótese da Curva Ambiental de Kuznets quanto o Índice de Complexidade Econômica, poucos estudos têm se dedicado a analisar em conjunto estas duas áreas de pesquisa. Ao conduzir uma busca no *Web of Science* por estudos que empregaram uma Revisão Sistemática da Literatura incorporando em conjunto a hipótese da EKC e o Índice de Complexidade Econômica, apenas um artigo foi encontrado. A busca foi realizada em março de 2024, sem aplicação de restrições temporais, com base nos seguintes termos: “Systematic Literature Review” or “SLR” or “Bibliometric” and “Environmental Kuznets Curve” or “Environment Kuznets Curve” or “EKC” or “EKC hypothesis” and “Economic Complexity Index” and “ECI”. A Tabela 1 apresenta as principais contribuições e limitações do artigo. Apesar de trazer grandes contribuições para a literatura, este estudo aborda a EKC apenas como uma das principais correntes de pesquisa na crescente literatura, não fornecendo uma análise aprofundada sobre a ligação entre a hipótese da EKC e o ECI.

Tabela 1- RSL abordando Curva Ambiental de Kuznets e Complexidade Econômica

Autores	Palavras-Chave	Método	Base de Dados	Período	Artigos Analisados	Contribuições	Limitações
B. Dogan et al., 2023	Economic complexity; Export quality; Trade diversification; Bibliometric analysis; Industry and innovation; Sustainable development goals	Bibliometria	Scopus and Web of Science	1966: 2021	653	Este estudo revela que a estrutura econômica é um tópico relevante para abordar questões sociais e ambientais. Além disso, este trabalho destaca a importância da qualidade das exportações e da complexidade econômica para o desenvolvimento econômico sustentável, enfatizando a inter-relação entre essas variáveis e o progresso dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS).	O estudo concentrou-se principalmente na relação entre complexidade econômica e qualidade das exportações e seus impactos no domínio socioeconômico. Em outras palavras, o artigo não conduz uma investigação em profundidade sobre a relação entre Complexidade Econômica e a hipótese da Curva Ambiental de Kuznets.

Fonte: Elaborado pelo autor

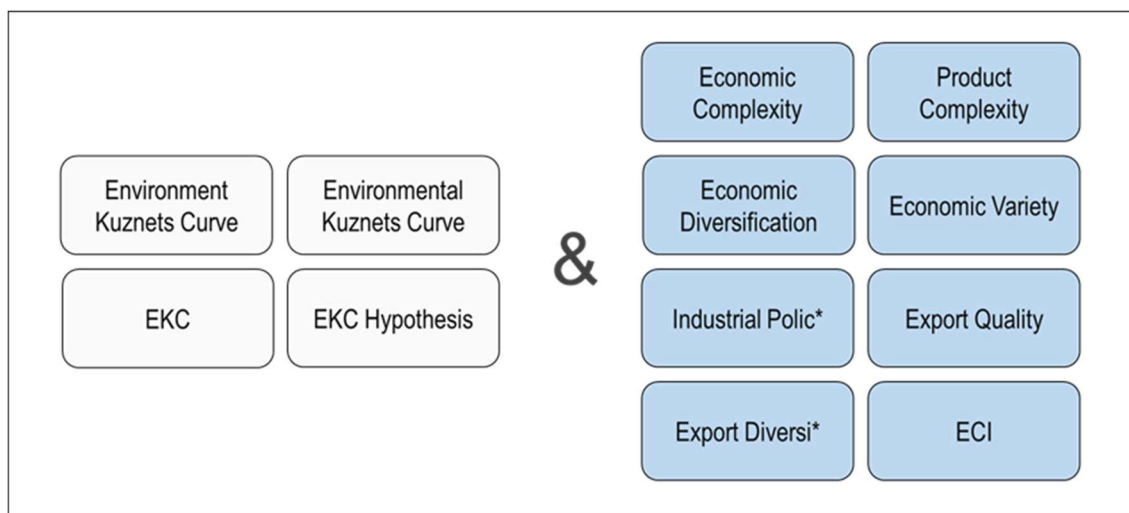
Identifica-se, portanto, uma ausência de estudos que revisem sistematicamente o nexo entre a Complexidade Econômica e a degradação ambiental sob a ótica da Curva Ambiental de Kuznets. Embora exista uma ampla diversidade de estudos que explorem essas duas dimensões e seus impactos socioeconômicos, não foram encontrados artigos que empreguem uma revisão sistemática abordando os dois campos em conjunto na base de dados do *Web of Science*. Com o objetivo de preencher essa lacuna da literatura, esse artigo realizou uma análise bibliométrica da literatura existente sobre a relação entre crescimento econômico, degradação ambiental e complexidade econômica, com base no arcabouço teórico da Curva Ambiental de Kuznets. Foram analisados os principais artigos da literatura, visando examinar a evolução da produção científica, a evolução dos periódicos mais relevantes, publicações e citações dos autores ao longo dos anos, os artigos e palavras-chave mais relevantes da literatura, bem como a colaboração das publicações inter e intra países. Dessa forma, este artigo preenche uma lacuna pouco explorada da literatura através de uma análise abrangente, proporcionando uma melhor compreensão desta dimensão acadêmica.

2.2. MÉTODO E DADOS

Esta seção apresenta o material e os dados utilizados na condução da análise bibliométrica empregada neste estudo. A análise bibliométrica combina a hipótese da Curva Ambiental de Kuznets e Complexidade Econômica, além de incorporar termos relacionados à estrutura produtiva dos países. Diversos estudos têm empregado ferramentas bibliométricas com o intuito de gerar informações significativas da literatura, como a identificação dos principais métodos, bases de dados, autores e periódicos mais relevantes (Ferraz e Pyka, 2023). Verifica-se a importância desta técnica de revisão, pois ela fornece informações relevantes da literatura existente, como a identificação de lacunas estruturais e agenda de pesquisas futuras (Aria e Cuccurullo, 2017).

Objetivando coletar as principais publicações da literatura, este estudo empregou uma busca baseada em palavras-chave na base de dados acadêmica *Web of Science*. A pesquisa foi conduzida em março de 2024, empregando os seguintes termos: Environmental Kuznets Curve; Environment Kuznets Curve; EKC; EKC hypothesis; Economic Complexity; ECI; Product Complexity; Economic Diversi*; Economic Variety; Industrial Polic*; Export quality; Export Diversi*. A Figura 3 apresenta as 12 palavras-chave adotadas para a pesquisa no *Web of Science*.

Figura 3 - Palavras-chave utilizadas na pesquisa

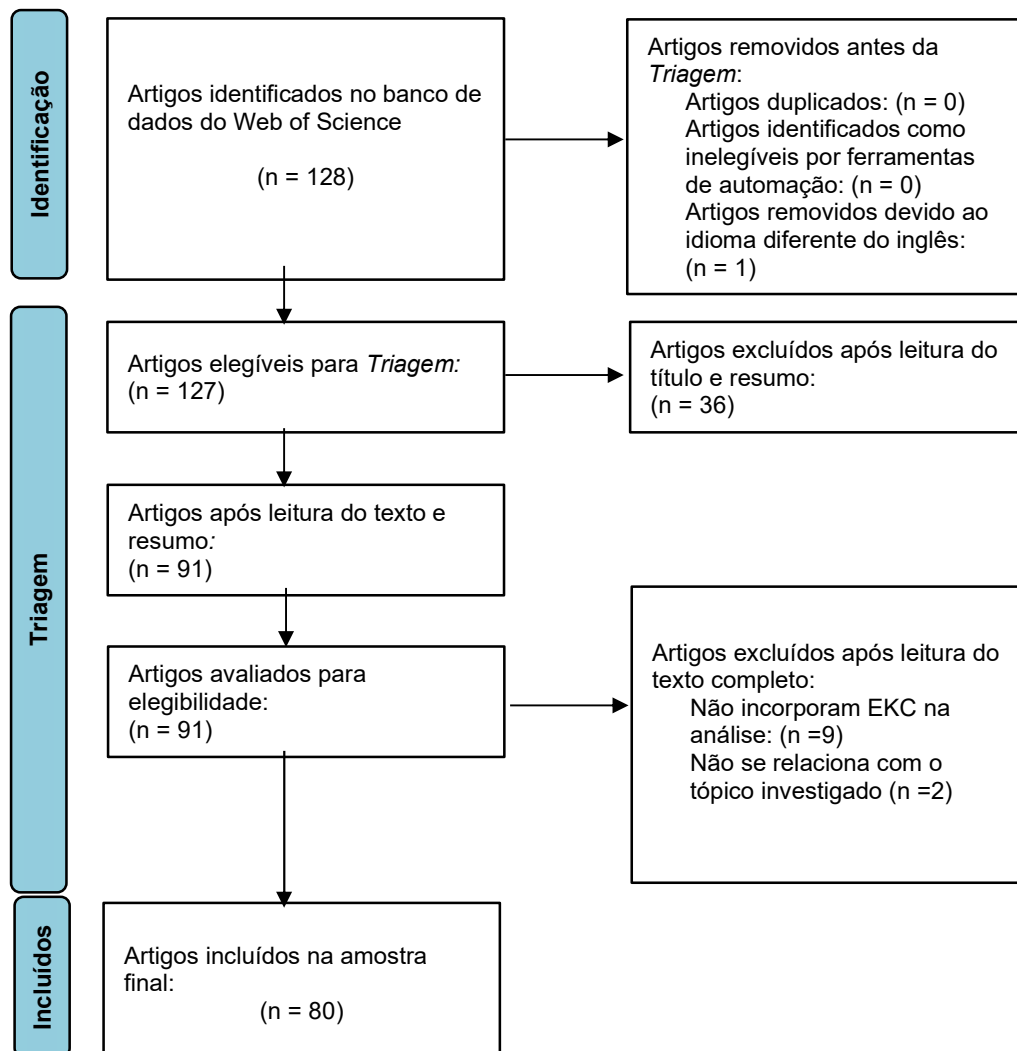


Fonte: Elaborado pelo autor

O protocolo PRISMA apresenta o passo a passo da análise do material extraído do *Web of Science*. A primeira etapa consiste em definir as palavras-chave e, segundo Kraus et al. (2022), as palavras-chave devem ser escolhidas com base em leitura de artigos anteriores. Nesse sentido, este estudo analisou 9 artigos de revisão sistemática da literatura sobre a hipótese da Curva Ambiental de Kuznets. Além desses 9 artigos, um artigo que incorporou na revisão

sistemática da literatura tanto a hipótese da EKC quanto a Complexidade Econômica simultaneamente foi examinado (Tabela 1) e, portanto, incorporado à análise.

Figura 4 - Protocolo PRISMA



Fonte: Elaborado pelo autor

O processo de busca identificou um total de 128 artigos. Destes, um foi excluído devido ao idioma diferente do inglês. Com os artigos selecionados, foi realizado o processo de triagem, que envolve a análise do título e do resumo de cada artigo para determinar sua relevância para a investigação proposta neste estudo. Durante essa etapa, 36 artigos foram excluídos por não abordarem completamente o escopo da pesquisa em questão. Os artigos restantes foram submetidos à uma investigação mais aprofundada. Com o objetivo de examinar se os artigos incorporam a hipótese da EKC, não só como palavras-chave ou referencial teórico, mas como objeto de análise, foi efetuado uma leitura dos tópicos metodologia e conclusão. Nesta etapa, 10 artigos foram excluídos, pois não se adequaram aos critérios de pesquisa e outros 2 foram

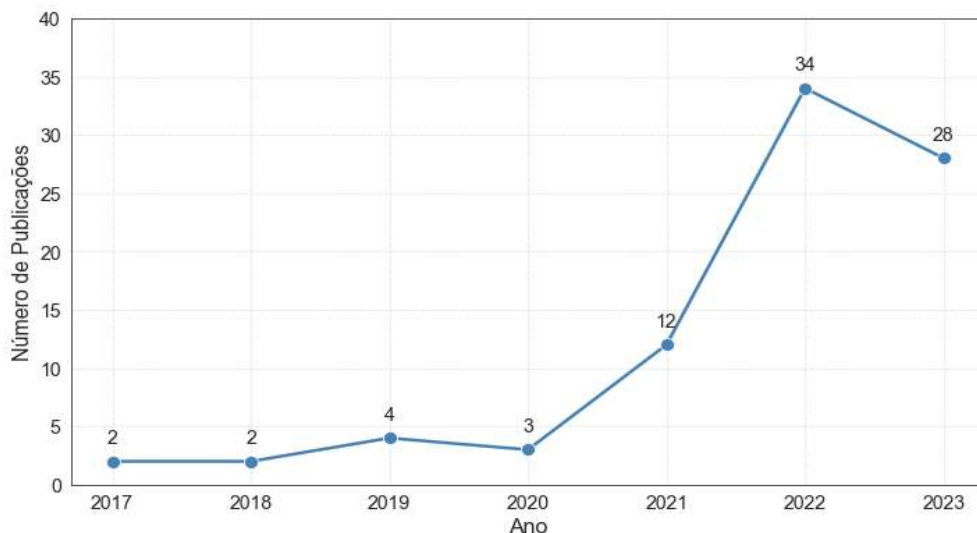
excluídos pois não se relacionam com o tema investigado. Os artigos restantes foram submetidos à análise bibliométrica e revisão sistemática da literatura.

2.3. RESULTADOS

2.3.1. Análise Bibliométrica

A análise do crescimento das publicações ao longo do tempo é um aspecto relevante para analisar uma comunidade científica (Ferraz e Pyka, 2023). Por este motivo, esta seção apresenta a análise dos estudos sobre Environmental Kuznets Curve (EKC) e estrutura produtiva (*i.e.*, ECI, *export quality* e *export diversification*) entre 2017 e 2024. A Figura 5 apresenta a produção científica anual desta comunidade. Observa-se que as publicações acerca do tema analisado iniciam em 2017. O estudo de Can e Gozgor (2017) analisou o impacto do crescimento econômico, consumo de energia e complexidade econômica sobre o nível de emissões de CO_2 , na França, entre 1964 e 2014. Este estudo apresentou que o PIB e o consumo de energia aumentam as emissões de CO_2 , enquanto o ECI as diminui. Além disso, os resultados deste estudo evidenciaram uma relação em forma de U invertido entre PIB e emissões de CO_2 na França. O segundo estudo em 2017, também de Can e Gozgor, discorreu sobre os efeitos do crescimento econômico, abertura comercial, consumo de energia e qualidade de exportações sobre as emissões de CO_2 , na China, entre 1971 e 2010. Este estudo revelou que o nível de emissões de CO_2 aumenta com a renda a longo prazo, validando a hipótese EKC. Para mais, o estudo evidenciou que o PIB, o consumo de energia e abertura comercial aumentam as emissões de CO_2 , enquanto exportações de maior qualidade reduzem as emissões de CO_2 na China.

Figura 5 - Produção científica anual

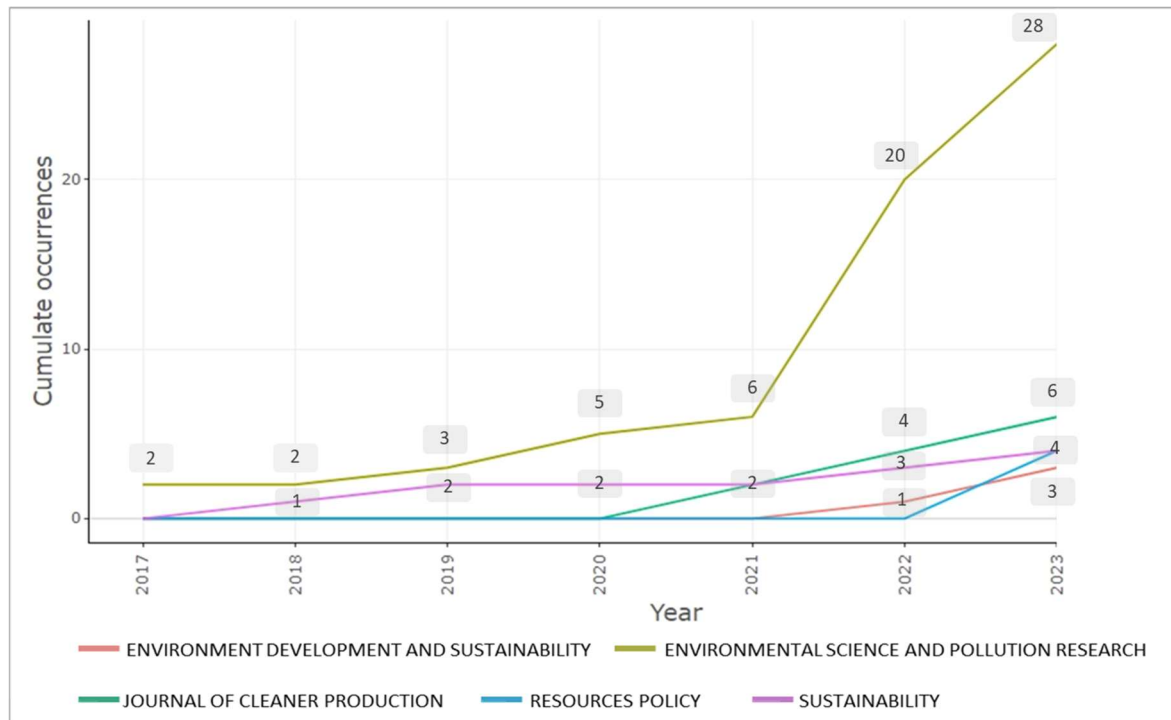


Fonte: Elaborado pelo autor

Nota-se que a partir de 2020, houve aumento significativo no número de publicações. Isto porque a taxa de crescimento das publicações entre 2020 e 2021 foi de 300% ao ano (a.a.), enquanto a taxa de crescimento entre 2021 e 2022 foi de 183,3% a.a. O maior número de publicações ocorreu em 2022, quando somaram 34 publicações sobre EKC e estrutura produtiva em um único ano. O crescimento dos estudos sobre EKC decorre da proeminência de debates sobre a relação entre meio ambiente e crescimento econômico, que motiva pesquisadores a aprofundarem as pesquisas sobre a interconexão entre crescimento econômico e poluição ambiental (Naveed et al. 2022). Ademais, as crescentes preocupações acerca das mudanças climáticas têm promovido diversas medidas globais em busca de maior qualidade ambiental, como, por exemplo, o Acordo de Paris (2015) e a definição dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) propostos pela Organização das Nações Unidas (2015). Estas medidas aumentam o interesse dos pesquisadores sobre análises voltadas aos diversos problemas ambientais, setores econômicos e processos causais desta relação (Naveed et al. 2022).

Os artigos relacionados à hipótese da EKC e à estrutura produtiva vêm sendo publicados em diversos periódicos. Ferraz e Pyka (2023) argumentam que os periódicos são um importante meio de disseminação de conhecimento, principalmente para comunidades de pesquisa e para a audiência científica. A Figura 6 apresenta a evolução dos cinco periódicos mais relevantes em termos de publicações acumuladas ao longo dos anos. A análise revela o fortalecimento do interesse internacional por essa temática. O *Environment Science and Pollution Research* destaca-se como o periódico de maior crescimento, consolidando-se como importante veículo de publicação sobre o tema. Também chama atenção a evolução das publicações do periódico *Resources Policy*, que passaram a publicar estudos relacionados ao tema apenas recentemente, indicando a incorporação gradual dessa agenda em diferentes campos de pesquisa. Além disso, periódicos como *Environment, Development and Sustainability*, *Journal of Cleaner Production* e *Sustainability* demonstram expansão consistente, refletindo o amadurecimento e a ampliação deste domínio de pesquisa. Em conjunto, esses avanços evidenciam que a relação entre estrutura produtiva, complexidade econômica e a hipótese da EKC vem ganhando espaço e reconhecimento na literatura internacional, reafirmando sua relevância teórica e empírica para a compreensão dos impactos ambientais do desenvolvimento econômico.

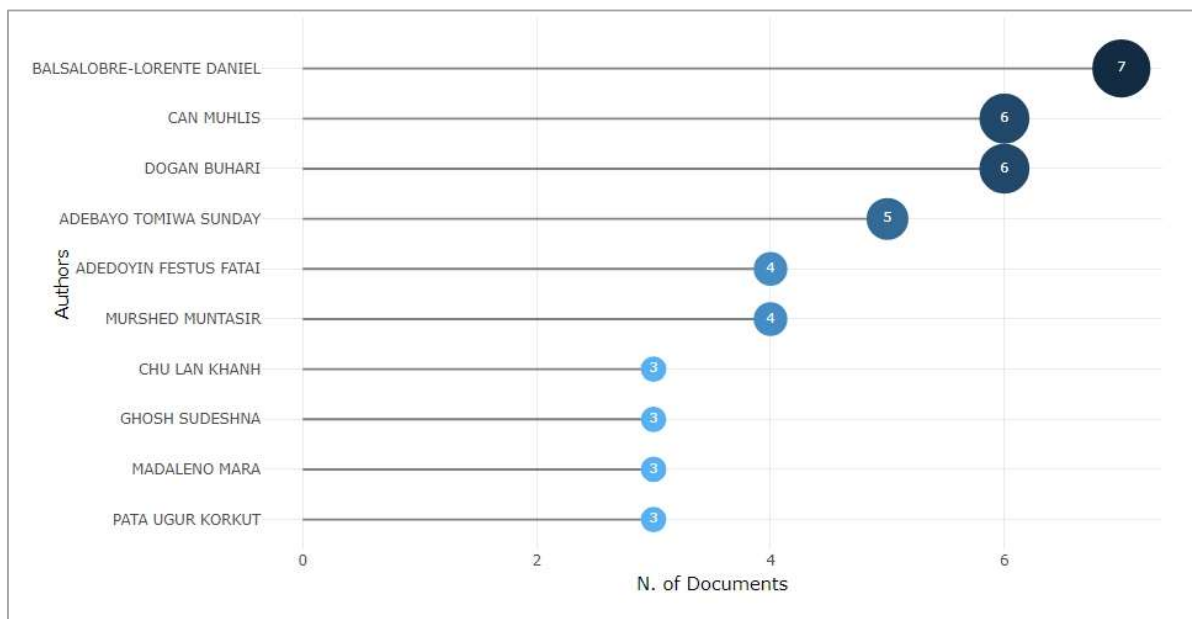
Figura 6 - Produção científica anual por periódico



Fonte: Elaborado pelo autor

A análise dos autores mais produtivos e mais citados permite identificar os principais pesquisadores que têm contribuído para o avanço dessa linha de pesquisa. A Figura 7 apresenta os dez autores com maior número de publicações sobre a hipótese da EKC em relacionada à estrutura produtiva. Observa-se a forte atuação de Balsalobre-Lorente Daniel, que se destaca como o autor mais prolífico, com sete artigos publicados. Em seguida, Can Muhlis e Dogan Buhari apresentam seis publicações cada, evidenciando participação consistente no debate. Adebayo T. Sunday ocupa posição de destaque com cinco estudos, enquanto Adedoyin F. Fatai e Murshed Muntasir somam quatro estudos cada. Por fim, Chu L. Khanh, Ghosh Sudeshna, Madaleno Mara e Pata Ugur Korkut completam o grupo, cada um com três publicações.

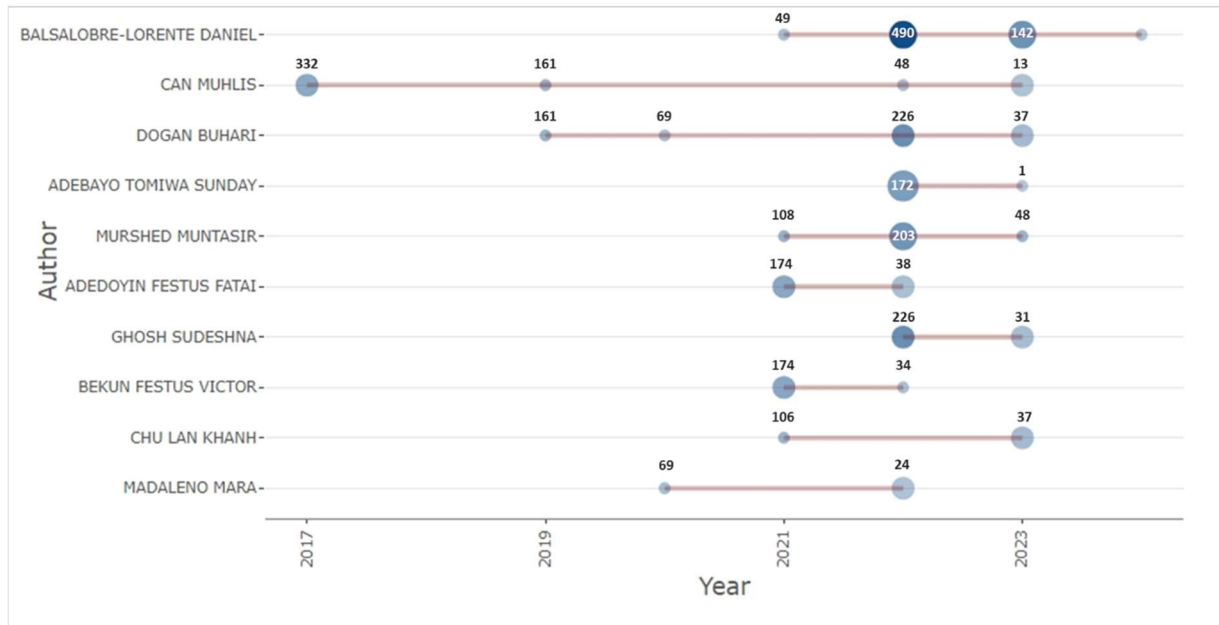
Figura 7 - Top 10 autores que mais publicaram



Fonte: Elaborado pelo autor

A Figura 8 apresenta a evolução temporal das publicações e citações dos dez autores mais relevantes desse campo de pesquisa. Observa-se que o volume de citações se concentra fortemente entre 2020 e 2022, período que coincide com o pico de publicações identificado na análise anterior. Balsalobre-Lorente Daniel destaca-se como o pesquisador de maior impacto, com 682 citações, a maioria registradas em 2022, o que evidencia sua influência recente no campo. Can Muhlis, pioneiro nessa dimensão de estudo, apresenta 552 citações concentradas em 2017, o que reflete contribuições iniciais importantes para a consolidação teórica do tema. Dogan Buhari, com 523 citações, integra o grupo de autores com contribuições expressivas para o avanço dessa linha de pesquisa. Já pesquisadores como Adebayo T. Sunday, Murshed Muntasir e Adedoyin F. Fatai demonstram uma trajetória ascendente mais recente, com aumento expressivo de publicações e citações a partir de 2021, evidenciando a renovação e a expansão do debate. Outros autores, como Ghosh Sudeshna, Bekun F. Victor, Chu L. Khanh e Madaleno Mara, ainda que com menor volume absoluto de citações, apresentam inserção crescente na literatura recente, contribuindo para o fortalecimento do tema sob diferentes abordagens. De modo geral, os números evidenciam a expansão acelerada da produção científica sobre a relação entre a estrutura produtiva e a dinâmica ambiental, reforçando o amadurecimento e a consolidação dessa área de investigação na literatura internacional.

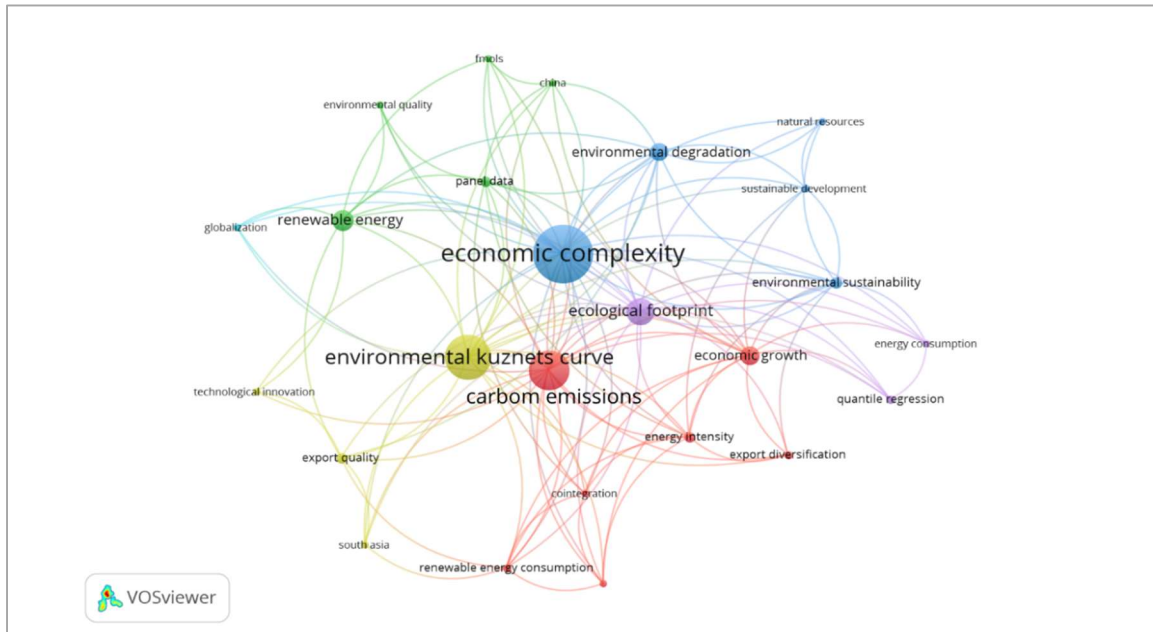
Figura 8 - Publicações e citações ao longo do tempo



Fonte: Elaborado pelo autor

Em cada artigo publicado, os autores devem fornecer palavras-chave que descrevam o tema analisado em seus artigos (Naveed et al. 2023). Estas palavras-chave contêm informações importantes sobre a pesquisa realizada no estudo. Nesse sentido, a Figura 9 apresenta a rede de palavras-chave mais utilizadas nos 80 artigos selecionados. Os termos que mais se repetiram nos estudos foram Economic Complexity (52), Environmental Kuznets Curve (36) e Carbon Emissions (31). Estes três termos representam as variáveis mais significativas deste framework, indicando uma convergência de interesses em investigar o impacto da complexidade econômica sobre as emissões poluentes, com base na hipótese EKC (Gozgor e Can, 2017; Dogan et al., 2019; Kherzi et al., 2022). Outros termos relevantes desta dimensão de pesquisa constam da rede de palavras-chave. Ecological Footprint (18) vem sendo frequentemente empregado na literatura como alternativa ao termo emissão de CO_2 (Yilanci e Pata, 2020; Alvarado et al., 2021; Ali et al., 2022). Renewable Energy (13) vem ganhando notoriedade na literatura. A transição de matriz energética para energias renováveis tende a promover efeitos positivos para o meio ambiente (Khan et al., 2021; Rahman et al., 2022). Economic Growth (11) e Environmental Degradation (10) evidenciam a relevância da análise da relação entre crescimento econômico e degradação ambiental como tópico central deste tema (Murshed e Dao, 2022; Ahmed et al., 2021; Adedoyin et al., 2021).

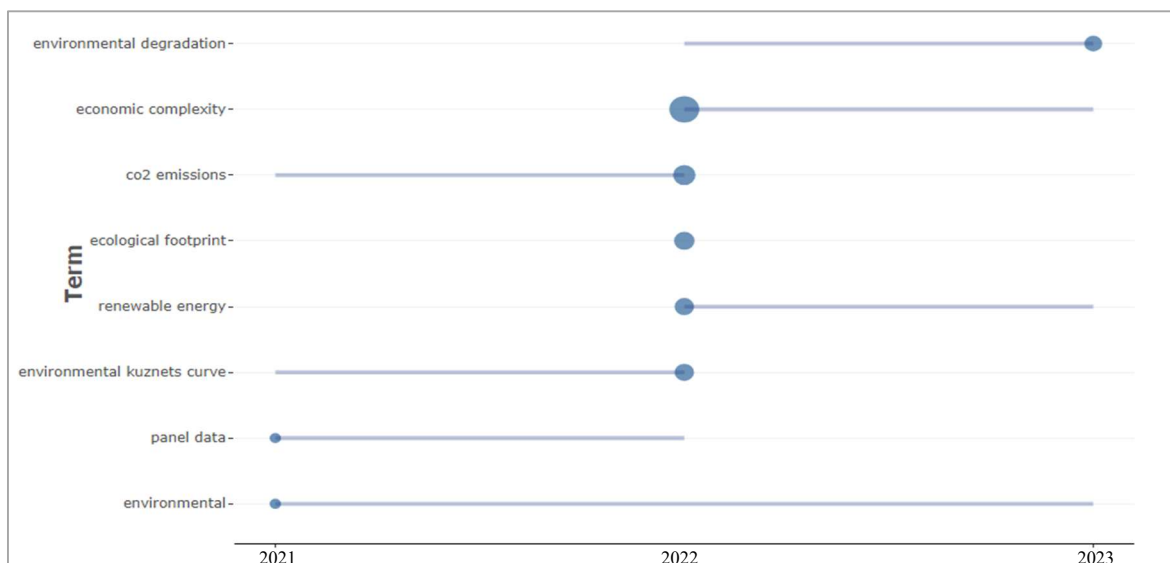
Figura 9 - Rede de Palavras-chave



Fonte: Elaborado pelo autor

A figura 10 evidencia que o termo *Environmental Degradation*, apesar de utilizado com mais frequência a partir de 2022, vem ganhando grande importância nos últimos estudos. O termo *Economic Complexity* segue a mesma dinâmica, no entanto, a recorrência em sua utilização é ainda maior. *CO₂ Emissions* apresenta aplicações recorrentes desde 2021, com seu ápice de utilização em 2022, no entanto, vem perdendo forças. Este fato pode ser explicado, pelo menos em parte, pela utilização de outras variáveis como *proxy* para a captação da degradação ambiental. Nesse sentido, o termo *Ecological Footprint* vem recebendo maior importância a partir de 2022.

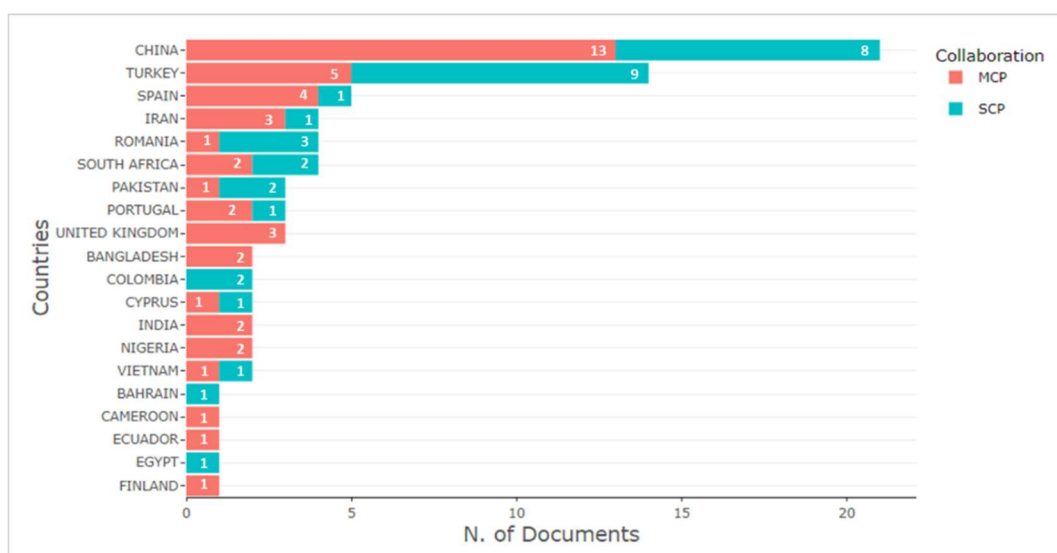
Figura 10 - Utilização de termos ao longo do tempo



Fonte: Elaborado pelo autor

A Figura 11 apresenta a distribuição das publicações por nacionalidade dos autores e o tipo de colaboração entre eles, distinguindo entre colaborações internas (Intra-País – SSP) e internacionais (Inter-País – MCP). Observa-se que a China lidera em número de artigos, com 21 publicações, sendo a maioria resultante de colaborações internacionais, o que evidencia sua ampla inserção em redes globais de pesquisa. A Turquia ocupa a segunda posição, com 14 estudos, predominando as colaborações entre autores do mesmo país. A Espanha aparece em seguida, com cinco publicações, quatro delas desenvolvidas em parceria internacional. Outros países com presença relevante incluem Irã, Romênia e África do Sul, com quatro trabalhos cada, além de Paquistão, Portugal e Reino Unido, com três publicações. Nota-se que China e Turquia concentram aproximadamente dois terços da produção entre os 20 países mais produtivos, reforçando o papel de ambos como polos de pesquisa emergentes na investigação sobre a hipótese da EKC e a estrutura produtiva.

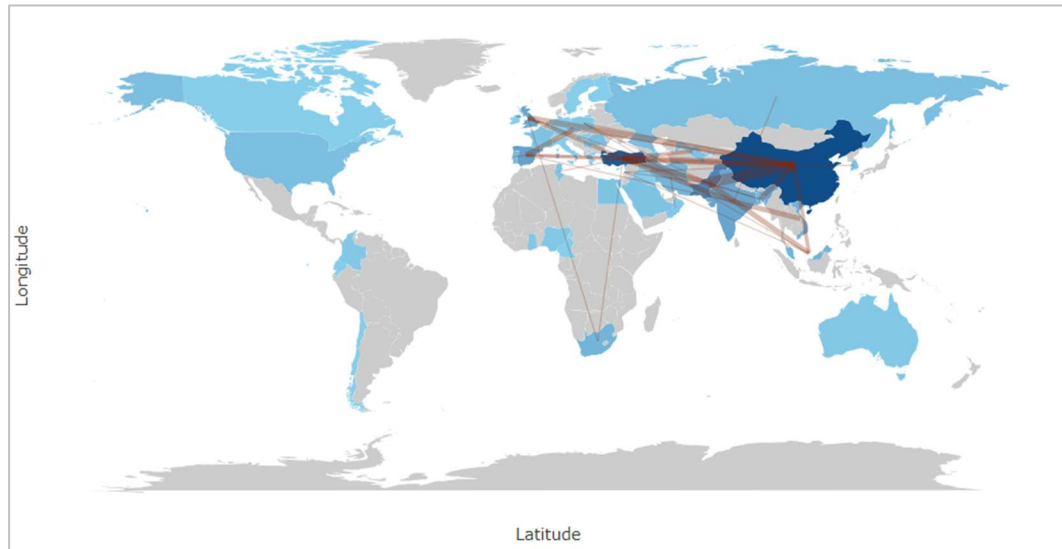
Figura 11 - Publicação de artigos com base na nacionalidade



Fonte: Elaborado pelo autor

No que se refere às colaborações internacionais (Inter-País – MCP), observa-se que a China ocupa posição central nas redes de coautoria, com destaque para as parcerias recorrentes com Paquistão, Turquia, Espanha e Reino Unido. A colaboração entre China e Paquistão é a mais frequente, seguida pelos vínculos com Turquia e Reino Unido, evidenciando o papel central da China nas interações internacionais dessa literatura. A Turquia, por sua vez, apresenta uma rede de colaborações mais diversificada, com participações expressivas de pesquisadores do Paquistão, Índia, Reino Unido, Uzbequistão, África do Sul e Tunísia. De modo geral, os dados revelam que, embora o interesse pela relação entre estrutura produtiva e meio ambiente tenha se ampliado, a produção científica ainda se concentra fortemente em poucos países, especialmente China e Turquia.

Figura 12 - Colaboração Inter-País (MCP)

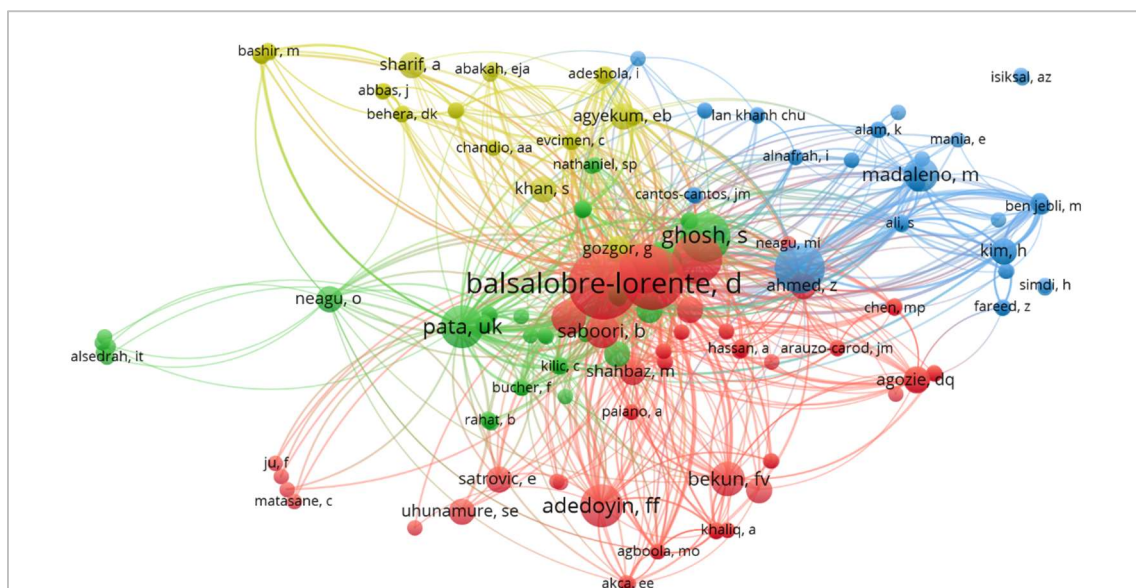


Fonte: Elaborado pelo autor

2.3.2. Análise da Rede de Citações

Para um melhor entendimento de como os artigos publicados se relacionam entre si, foi elaborada uma rede de citações a partir dos 80 artigos selecionados na análise. A figura 13 exibe a rede de citações, na qual as publicações são representadas pelos nós e as ligações entre estes nós indicam a direção do fluxo de conhecimento, isto é, o nó citado aponta para o nó que faz a citação (Ferraz e Pyka, 2023). O tamanho de cada nó representa a quantidade de citações que cada artigo recebeu na rede, que é determinado pela quantidade de ligações que a publicação tem com os artigos principais identificados na rede. Ademais, cada comunidade de pesquisa é representada por uma cor única.

Figura 13 - Rede de citações entre autores



Fonte: Elaborado pelo autor

Nesse estudo, foram identificados quatro clusters distintos, nos quais estão identificados da seguinte forma: Cluster 1 está representado pela cor amarela; Cluster 2 está representado pela cor azul; Cluster 3 está representado pela cor verde; e Cluster 4 está representado pela cor vermelha. Assim, os principais artigos de cada cluster foram selecionados para uma análise aprofundada a fim de explorar e registrar as principais contribuições de cada cluster.

Cluster 1 – Complexidade Econômica e EKC em Blocos Econômicos (amarelo)

O primeiro cluster é composto por artigos que analisaram a validade da hipótese EKC em diferentes blocos econômicos. Este cluster é importante, pois as análises em blocos econômicos distintos podem promover um melhor entendimento sobre como o desenvolvimento, complexidade econômica e degradação ambiental interagem em diferentes estágios de crescimento dentro de um conjunto de países com características socioeconômicas e políticas semelhantes. Nesse sentido, ao empregar análises voltadas aos blocos, é possível identificar a presença (ou não) de padrões entre o crescimento econômico e a degradação ambiental entre os países membros, facilitando a formulação de estratégias coordenadas e de políticas públicas que auxiliem a balancear, de maneira eficiente, crescimento e sustentabilidade.

O principal artigo desse cluster, “*The role of economic complexity in the environmental Kuznets curve of MINT economies: evidence from method of moments quantile regression*”, Adebayo et al. (2022) empregaram quatro métodos de regressão para analisar a validade da EKC no bloco MINT (México, Indonésia, Nigéria e Turquia), permitindo uma examinação mais rigorosa sobre como as variáveis selecionadas impactam as emissões de CO_2 . Os resultados dos estimadores Fully Modified Ordinary Least Square (FMOLS), Dynamic Ordinary Least Square (DOLS) e Fixed Effects-Ordinary Least Square (FE-OLS) mostraram que crescimento econômico, complexidade econômica e consumo de energia impactam positivamente as emissões de CO_2 , enquanto o termo quadrático do PIB apresentou efeito negativo nas emissões de CO_2 , validando a hipótese EKC em forma de “U-invertido”. Adicionalmente, os resultados do estimador *Method of Moments Quantile Regression* (MMQR) revelou que, ao longo de todos os quantis (1° ao 9°), crescimento econômico, complexidade econômica e consumo de energia, impactou positivamente as emissões de CO_2 , enquanto o termo quadrático do PIB, também teve efeito negativo nas emissões de CO_2 . Nesse sentido, o estudo confirma a validade da hipótese EKC em todos os métodos de regressão, sugerindo que, a medida em que as economias do MINT crescem, as emissões de CO_2 tende a crescer inicialmente, mas, eventualmente, tende a decrescer após as economias atingirem um certo nível de renda.

Utilizando os métodos FMOLS e DOLS, Khan et al. (2022) analisaram a validade EKC nos países do G7. Este artigo contribui significativamente para a literatura pois emprega variáveis diferentes da corrente principal, como inflação e desigualdade. Os resultados evidenciaram que complexidade econômica, crescimento econômico, consumo de energia não renovável, crescimento populacional, inflação, Investimento Externo Direto (IED) e abertura comercial tendem contribuir para o aumento da degradação ambiental, enquanto consumo de energia renovável e desigualdade impactam negativamente na degradação ambiental. Ademais, o termo quadrático de complexidade econômica apresentou impacto negativo na degradação ambiental, o que valida a hipótese da EKC, em formato de “U-invertido” para os países do G7. Os resultados empíricos revelam que a complexidade econômica inicialmente resulta em um aumento da degradação ambiental e, após atingir um determinado nível, a complexidade econômica mais elevada conduz a uma redução da deterioração ambiental (Khan et al., 2022).

Note que os dois artigos mais importantes do cluster 1 apresentam análises de blocos distintos. O primeiro examina um bloco com países em desenvolvimento e o segundo estuda o bloco G7, que incorpora os países mais industrializados do mundo. Este aspecto evidencia a importância desse cluster, ao apresentar as diferenças nos padrões de desenvolvimento econômico e as implicações ambientais decorrentes destes padrões. Esta distinção reforça a importância de políticas adaptadas às realidades específicas de cada bloco, considerando os diferentes estágios de desenvolvimento econômico e tecnológico dos países membros.

Cluster 2 – Qualidade e Diversificação de Exportações na Análise da EKC (azul)

O segundo cluster incorpora os artigos que analisaram a estrutura produtiva através de indicadores referentes à qualidade e à diversificação de exportação. Apesar de grande parte dos pesquisadores se concentrarem nos impactos do comércio internacional sobre a degradação ambiental, alguns trabalhos começaram a explorar como as exportações podem afetar as emissões de CO_2 (Khan et al., 2021).

Nesse sentido, o principal artigo desse cluster, *“The roles of export diversification and composite country risks in carbon emissions abatement: evidence from the signatories of the regional comprehensive economic partnership agreement”*, explorou, sob a ótica da hipótese EKC, como a diversificação das exportações impactou as emissões de CO_2 em doze países da Ásia, signatários da Parceria Econômica Regional Abrangente (RCEP). Adicionalmente, os autores também investigaram o efeito de crescimento econômico, consumo de energia renovável, inovação tecnológica e o risco país sobre as emissões de CO_2 . Os resultados do modelo Autoregressivo Distributed Lag (ARDL) revelaram que a promoção da transição

energética para fontes sustentáveis, a redução do risco país e incentivos à inovação tecnológica auxiliam na redução das emissões de CO_2 . Em contraste, crescimento econômico e diversificação das exportações tendem a aumentar as emissões (Khan et al., 2021). Para mais, os resultados validaram a hipótese EKC, certificando que o crescimento econômico das nações do RCEP inicialmente contribui para o aumento das emissões, mas a partir de um certo ponto, passa a contribuir para o controle destas emissões (Khan et al., 2021).

No artigo *“Exploring the linkage between export diversification and ecological footprint: evidence from advanced time series estimation techniques”*, Ali et al. (2022) analisaram o impacto da diversificação da exportação sobre a pegada ecológica na Índia, através do método de regressão ARDL. Além disso, as variáveis intensidade energética, densidade populacional e crescimento econômico também foram analisadas. Os resultados indicaram que a diversificação da cesta de produtos de exportação da Índia está associada à melhoria da qualidade ecológica (Ali et al., 2022). Os resultados também revelaram que o aumento da intensidade energética piora a qualidade ambiental, enquanto uma maior densidade populacional contribui para a redução da degradação ambiental (Ali et al., 2022). O estudo também confirma uma relação em forma de U invertido entre pegada ecológica e crescimento econômico.

Murshed e Dao (2022) investigaram como a qualidade de exportações impacta a emissão de CO_2 em cinco economias do Sul da Ásia. O estudo utilizou três métodos de regressão – a saber: Mean Group (MG), Common Correlated Effects Mean Group (CCEMG) e Augmented Mean Group (AMG) – para verificar, além da qualidade de exportações, o efeito do crescimento econômico, consumo total de energia, urbanização, desenvolvimento financeiro e IED. Os resultados evidenciaram que o consumo total de energia, o crescimento econômico, o desenvolvimento financeiro e o IED tendem a contribuir para o aumento das emissões. Por outro lado, o aumento da qualidade de exportações está associado a redução das emissões de CO_2 , retratando o papel benéfico do aprimoramento da qualidade das exportações para a redução de emissões de CO_2 nas economias do Sul da Ásia (Murshed e Dao, 2022).

Os artigos mencionados revelam uma significativa heterogeneidade quanto aos impactos da estrutura de exportação na deterioração ambiental, o que ressalta a importância desse cluster para a literatura. Nesse contexto, como apontam Khan et al. (2021), explorar os impactos ambientais sob a ótica das exportações é relevante, pois pode auxiliar formuladores de políticas públicas na busca simultânea da sustentabilidade econômica e ambiental.

Cluster 3 – Validação da EKC baseada em Complexidade Econômica (verde)

O terceiro cluster é composto por artigos que utilizaram a complexidade econômica para testar a validade da hipótese EKC. Numam et al. (2022) argumentam que a complexidade econômica pode ser definida como um conceito baseado na variedade de produtos produzidos pelos países, que ajuda a explicar o nível de desenvolvimento entre os países e expressa as competências dos países no âmbito da produção. Nesse sentido, o ECI, que abrange uma ampla gama de atividades econômicas, pode ser um bom indicador para avaliar o comportamento ecológico das economias (Alvarado et al., 2021).

O principal artigo do cluster, *“Renewable and non-renewable energy consumption, economic complexity, CO₂ emissions, and ecological footprint in the USA: Testing the EKC hypothesis with a structural break”*, empregou o ECI para testar a validade da hipótese EKC nos Estados Unidos. Adicionalmente, o artigo contribui para a literatura ao mensurar os impactos da complexidade econômica, consumo de energia e globalização sobre as emissões de CO₂ e sobre a pegada ecológica, simultaneamente. Os resultados evidenciam que o consumo de energia renovável contribui para a redução das emissões de CO₂ e pegada ecológica, enquanto o consumo de energia não renovável aumenta a degradação ambiental. Os efeitos da globalização só foram estatisticamente significativos no modelo de emissões de CO₂, contribuindo para a redução das emissões. Além disso, o estudo valida a relação em formato de “U invertido” entre o Índice de Complexidade Econômica e ambos os indicadores de poluição ambiental (emissões de CO₂ e Pegada Ecológica), confirmando a hipótese EKC (Pata, 2021).

Neagu (2019), no artigo *“The Link between Economic Complexity and Carbon Emissions in the European Union Countries: A Model Based on the Environmental Kuznets Curve (EKC) Approach”*, utilizou os estimadores FMOLS e DOLS para examinar a relação entre complexidade econômica, intensidade energética e emissões de CO₂ em 25 países da União Europeia. Os resultados revelam que a intensidade energética contribui para um aumento das emissões. Ademais, a partir de uma análise individual dos países selecionados, o estudo evidenciou que para apenas seis economias da União Europeia – a saber: França, Itália, Finlândia, Bélgica, Suécia e Reino Unido – a hipótese EKC é validada pela complexidade econômica, ilustrando uma relação em formato de “U invertido” (Neagu, 2019).

Como evidenciado pelos artigos acima, a complexidade econômica se destaca como um importante preditor dos impactos ambientais decorrentes da atividade produtiva. Dessa forma, como exposto por Alvarado et al. (2021), o índice de complexidade econômica é um dos critérios que captura de forma abrangente o nível de sofisticação de uma economia, avaliando o número de processos envolvidos na produção e diversificação das atividades econômicas, medindo a própria atividade econômica. Dessa forma, a consideração da complexidade

econômica é de significativa importância para a mensuração dos impactos ambientais e, consequentemente, para a teoria da EKC como um todo.

Cluster 4 – Validação da EKC baseada na Riqueza com Incorporação do ECI (vermelho)

O quarto cluster reúne os artigos que seguiram a corrente principal da teoria EKC, empregando a riqueza (i.e., o PIB) para testar a validade da hipótese. Como argumentado por Dogan et al. (2019), que os esforços de crescimento econômico dos países são o principal propulsor do aquecimento global, Gozgor e Can (2017) argumentam que esses esforços, que continuam em ritmo acelerado, levarão a um maior consumo de energia e, consequentemente, maior degradação ambiental. Nesse contexto, um grande número de pesquisadores tem se dedicado a examinar a relação entre crescimento econômico e seus impactos ao meio ambiente.

Gozgor e Can (2017), no artigo *“The impact of economic complexity on carbon emissions: evidence from France”*, empregaram o método DOLS para examinar os impactos do crescimento econômico, do consumo de energia e da complexidade econômica sobre as emissões de CO_2 na França. Os resultados revelaram que o crescimento econômico e o consumo de energia contribuem para o aumento das emissões, enquanto a complexidade econômica induz a redução das emissões. Adicionalmente, o estudo evidencia que o crescimento econômico gera aumento de emissões até um determinado nível de renda per capita e, a partir desse ponto, as emissões tendem a se reduzir, o que valida a hipótese EKC, em forma de “U invertido” para a França.

Balsalobre-Lorente et al. (2021) examinaram os efeitos decorrentes do crescimento econômico, da complexidade econômica e do consumo de energia renovável sobre as emissões de CO_2 , nos países integrantes do BRICS. Os resultados dos estimadores FMOLS e DOLS confirmaram a relação de “U invertido” entre crescimento econômico e emissões de CO_2 , validando a hipótese EKC para os países do BRICS. Adicionalmente, os resultados revelaram que a complexidade econômica e o consumo de energia renovável estão negativamente associados às emissões de carbono, demonstrando que a estrutura produtiva e a inovação dos países, juntamente com as energias limpas, tendem a promover melhorias ambientais (Balsalobre-Lorente et al., 2021).

Note que o estudo da relação entre o crescimento econômico e a degradação ambiental fornece a base teórica da Curva Ambiental de Kuznets. Observa-se ainda que as estratégias de crescimento econômico vêm resultando em importantes dificuldades ambientais e, consequentemente, a elaboração de estratégias que promovam crescimento econômico ao mesmo tempo em que preservem e promovam qualidade ambiental se tornou a grande

prioridade dos últimos anos (Murshed e Dao, 2022). Nesse sentido, é possível identificar que a consideração de variáveis relacionadas ao crescimento econômico ainda traz importantes contribuições para a literatura, podendo ainda ser empregadas de forma combinada com variáveis da estrutura produtiva.

2.3.3. Vertentes Teóricas

A análise bibliométrica e os clusters da literatura evidenciam a articulação entre a Curva Ambiental de Kuznets e a complexidade econômica. Isto revela um campo teórico em consolidação, marcado por abordagens que buscam compreender os mecanismos estruturais do desenvolvimento sustentável. Os artigos analisados revelam a formação de três correntes teóricas principais, que serão abordadas a seguir: (i) a abordagem da EKC tradicional, que testa a validade da hipótese por meio do crescimento econômico (Can e Gozgor, 2017; Dogan, 2019; Pata et al., 2022); (ii) a vertente estruturalista, que foca na estrutura produtiva e na qualidade das exportações (Madaleno et al., 2022; Pata, 2021; Khan et al., 2021) e; (iii) uma linha emergente com foco institucional e tecnológico, que enfatiza os mecanismos de inovação, governança e políticas energéticas (Chu, 2020; Balsalobre-Lorente et al., 2024; Udeagha e Muchapondwa, 2022).

Na corrente da EKC tradicional, os estudos mantêm como ponto fundamental a hipótese original da EKC, segundo a qual a degradação ambiental decresce após atingir um limiar de renda. Trabalhos como Dogan et al. (2019) e Murshed e Dao (2022) atualizam essa formulação ao introduzir variáveis mediadoras, como abertura comercial, investimento estrangeiro direto, consumo energético e complexidade econômica, o que permite maior aderência às transformações produtivas contemporâneas.

Esses estudos confirmam a relação em forma de U invertido prevista pela EKC, mas ressaltam que a inflexão ambiental não ocorre automaticamente com o crescimento da renda (Dogan et al. 2020). Em vez disso, a inflexão depende de mudanças estruturais na matriz energética e na sofisticação produtiva (Can e Gozgor, 2017; Yilanci e Pata, 2021). Em economias de alta renda, o ponto de virada para a recuperação ambiental é atingido quando o crescimento é acompanhado de inovação tecnológica e da expansão de fontes renováveis (Khan et al., 2022; Dogan et al., 2022). Em países emergentes, o crescimento ainda está fortemente associado à intensificação de emissões, revelando que a transição ecológica é um processo gradual e dependente de capacidades produtivas acumuladas (Adebayo et al., 2022; Ali et al., 2022).

Alguns estudos têm incorporado variáveis demográficas e estruturais para captar efeitos

adicionais sobre a degradação ambiental. Ali et al. (2022) demonstraram que a densidade populacional exerce um efeito mitigador sobre a pegada ecológica, indicando que o adensamento urbano pode gerar ganhos de eficiência no uso de recursos e na provisão de infraestrutura, reduzindo a pressão ambiental associada à expansão econômica. Por outro lado, Khezri et al. (2022) observaram que a urbanização, embora tenda a elevar as emissões de CO₂ no curto prazo em virtude do aumento da demanda energética e da concentração industrial, tem seus efeitos suavizados no longo prazo à medida que o crescimento urbano se combina com maior renda per capita, diversificação produtiva e difusão tecnológica.

Assim, a vertente clássica da EKC tem evoluído para uma abordagem condicionada, na qual o crescimento econômico é um dos fatores explicativos, mas não o determinante central. A inclusão de variáveis de estrutura produtiva e energética representa uma inflexão teórica importante, aproximando a EKC de modelos mais complexos de desenvolvimento sustentável.

A segunda base teórica identificada deriva da integração entre a EKC e a teoria da complexidade econômica, formulada por Hidalgo e Hausmann (2009) e amplamente empregada pelo Índice de Complexidade Econômica. Essa corrente parte do pressuposto de que o nível de sofisticação produtiva de uma economia não se caracteriza apenas como uma variável mediadora, mas afeta diretamente a intensidade das emissões de forma não linear, reproduzindo, em termos estruturais, a mesma lógica da EKC: em estágios iniciais, o aumento da complexidade pode ampliar as emissões, mas, após certo limiar, passa a reduzi-las.

Estudos como Pata (2021) e Neagu (2019) consolidam esse argumento ao demonstrar empiricamente que o ECI apresenta relação em U invertido com as emissões de CO₂ e a pegada ecológica. Para Pata (2021), o avanço da complexidade econômica é acompanhado pela substituição de fontes energéticas poluentes por alternativas renováveis, enquanto Neagu (2019) mostra que os ganhos de eficiência tecnológica explicam a redução das emissões em países com ECI elevado.

Outros trabalhos reforçam a tese de que a estrutura produtiva é determinante para o padrão ambiental, destacando que o tipo de complexidade, e não apenas seu nível, importa para a sustentabilidade (Khan et al., 2022; Tagvaei et al., 2022). Economias complexas baseadas em manufaturas limpas e inovação tendem a apresentar trajetórias compatíveis com a EKC (Tagvaei et al., 2022), enquanto aquelas cuja estrutura produtiva deriva de setores intensivos em carbono e indústria pesada podem perpetuar a degradação ambiental, mesmo em estágios avançados de desenvolvimento (Khan et al., 2022).

Alguns autores enfatizam a importância da qualidade e da diversificação das exportações como mediadores cruciais entre estrutura produtiva e sustentabilidade. Evidências empíricas

indicam que o avanço da qualidade e diversificação da cesta de produtos exportados constitui um importante mecanismo de mitigação da degradação ambiental (Ali et al., 2022; Murshed e Dao, 2022).

Esses autores identificam uma distinção crucial: a diversificação em direção a setores de maior valor agregado, de base tecnológica e de menor intensidade energética tende a reduzir as emissões e a validar a EKC. Por outro lado, quando a diversificação ocorre em atividades intensivas em recursos naturais ou energia, o efeito é inverso (Khan et al., 2021). Assim, a literatura mais recente reconhece que a direção da diversificação produtiva é tão relevante quanto sua magnitude.

Em síntese, a principal contribuição dessa corrente teórica é deslocar o debate da EKC da dimensão puramente macroeconômica para uma abordagem estrutural, enfatizando que o nível de sofisticação produtiva e o conhecimento incorporado na economia são pontos-chave para o desempenho ambiental. Com isso, a complexidade econômica e as exportações passam a ser entendidas não apenas como indicadores de sofisticação produtiva, mas como determinantes estruturais do desenvolvimento sustentável.

Uma terceira corrente teórica identificada é composta por estudos que integram as bases anteriores em um paradigma institucional e tecnológico. Essa vertente considera que a relação entre o crescimento econômico e o meio ambiente é mediada por fatores de governança, políticas públicas e inovações tecnológicas.

Estudos como Balsalobre-Lorente et al. (2024) e Udeagha e Muchapondwa (2022) exemplificam essa abordagem ao investigar como a presença de incerteza nas políticas econômicas afetam a qualidade ambiental. Udeagha e Muchapondwa (2022) evidenciam que níveis elevados de incerteza política e econômica tendem a intensificar a degradação ambiental, uma vez que a instabilidade reduz o investimento em tecnologias limpas, desestimula a inovação e incentiva o uso de fontes energéticas mais baratas e poluentes. De forma semelhante, Balsalobre-Lorente et al. (2024) observaram que a incerteza nas políticas econômicas exerce um impacto positivo sobre as emissões de carbono e a pegada ecológica nas economias do G-20, ao mesmo tempo em que enfraquece a relação positiva entre a complexidade econômica e a qualidade ambiental.

A literatura também destaca o papel da qualidade institucional na mediação da relação entre crescimento econômico e meio ambiente. Evidências empíricas mostram que instituições eficazes e estáveis favorecem a implementação de políticas ambientais consistentes, ampliam o investimento em pesquisa e desenvolvimento e criam incentivos para a difusão de tecnologias verdes (Pandhan et al., 2023). Isto porque países com melhor governança e maior capacidade

institucional apresentam maior eficiência na adoção de inovações energéticas e tecnologias limpas, o que contribui para reduzir as emissões de CO₂ no longo prazo. Em contrapartida, ambientes institucionais frágeis e marcados por instabilidade regulatória tendem a restringir os investimentos tecnológicos e a dificultar a transição para matrizes produtivas sustentáveis (Pandhan et al., 2023).

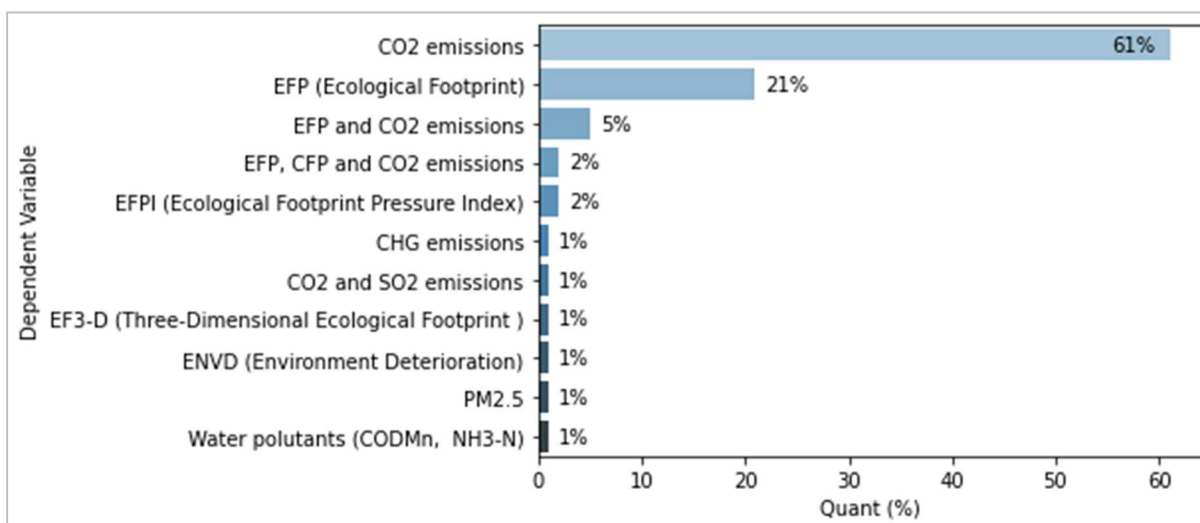
Em síntese, essa vertente teórica evidencia que a sustentabilidade não decorre simplesmente do avanço econômico, mas da capacidade dos países de internalizar externalidades ambientais por meio de regulação e inovações tecnológicas. Assim, a literatura contemporânea converge para uma visão sistêmica da EKC, na qual o crescimento econômico e o progresso tecnológico devem estar alinhados a políticas públicas que orientem a trajetória produtiva em direção a atividades de baixo carbono.

2.3.4. Estratégias de Pesquisa

Esta seção conduz uma análise aprofundada sobre as principais estratégias de pesquisa adotadas pelos autores. Foram analisadas as variáveis dependentes e independentes mais frequentemente empregadas na literatura, bem como as principais áreas geográficas e grupos econômicos investigados. Adicionalmente, serão discutidos os métodos e variáveis utilizados para a validação da EKC. Essa análise servirá não apenas para mapear o estado atual da pesquisa, mas também para identificar lacunas que podem ser exploradas em estudos futuros.

A Figura 14 apresenta as variáveis dependentes empregadas na literatura analisada. Note que 61% dos artigos utilizaram emissões de CO₂ como proxy para degradação ambiental, evidenciando a proeminência da variável emissões de CO₂ como proxy para degradação ambiental. Por outro lado, 21% dos artigos utilizaram Pegada Ecológica (EFP) como proxy para degradação ambiental, o que indica que a EFP vem sendo a alternativa às emissões de CO₂ mais empregada na literatura. Apenas 5% dos artigos realizaram análise simultânea das variáveis emissões de CO₂ e Pegada Ecológica. 2,5% dos artigos empregaram o Índice de Pressão da Pegada Ecológica (EFPI) e outros 2,5% utilizaram em conjunto três variáveis como proxy para degradação ambiental, a saber: Pegada Ecológica (EFP), Pegada de Carbono (CFP) e emissões de CO₂. Por fim, 1,25% dos artigos utilizaram outras variáveis como proxy para degradação ambiental, entre elas, emissões de gases do efeito estufa, emissões de CO₂ e SO₂, Pegada Ecológica Tridimensional, material particulado (PM 2.5) e poluentes da água.

Figura 14 - Variáveis dependentes utilizadas



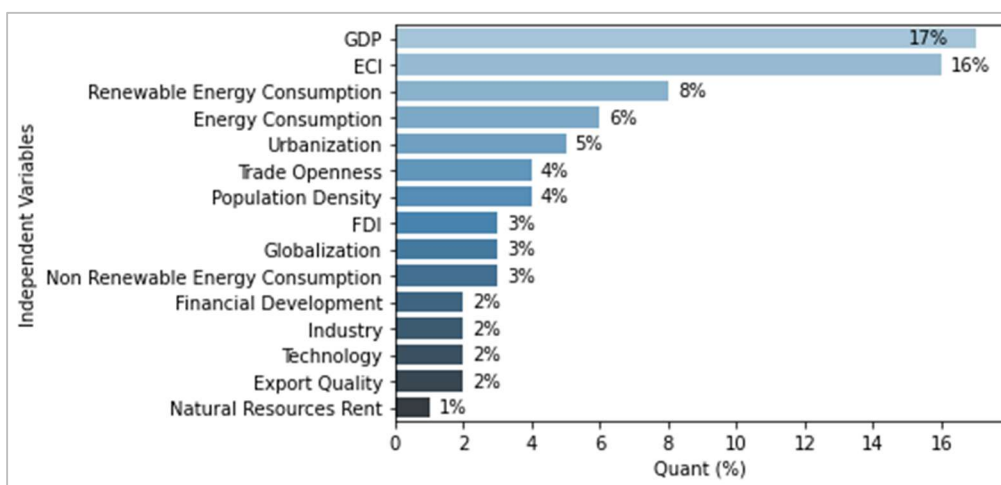
Fonte: Elaborado pelo autor

A Figura 15 exibe as quinze variáveis explanatórias mais utilizadas na literatura. Note que GDP (17%) é a variável mais utilizada nos artigos, o que é justificado pelo interesse dos pesquisadores em examinarem a relação não linear entre crescimento econômico e degradação ambiental, que se caracteriza como a ideia elementar deste campo de pesquisa, proposta por Grossman e Krueger (1991). Por outro lado, a investigação sobre a validade da hipótese EKC sob a ótica da Complexidade Econômica vem ganhando relevância na literatura nos últimos anos. Além do ECI ser utilizado como variável de referência para validade da EKC, diversos artigos têm empregado o termo como variável independente a fim de avaliar o seu impacto sobre a degradação ambiental (Can e Gozgor, 2017; Yilanci e Pata, 2020; Dogan et al., 2019). No conjunto de dados analisado neste trabalho, ECI foi utilizado em 16% dos artigos e, como visto na Figura 10, o uso do termo vem apresentando crescimento expressivo a partir de 2022, destacando sua grande relevância para a literatura. Diferentemente do crescimento econômico – que é, majoritariamente, encontrado como indutor de degradação ambiental (Khan et al., 2021; Adebayo et al., 2022; Ali et al., 2022) – os efeitos da Complexidade Econômica não são tão homogêneos, podendo apresentar impactos positivos (Yilanci e Pata, 2020; Khezri et al., 2022; Ali et al., 2022) ou negativos (Adedoyin et al., 2021; Ahmed et al., 2021; Leitão et al., 2021) sobre a deterioração do meio ambiente, a depender da conjuntura dos países analisados.

O impacto proveniente do consumo de energia foi examinado em 6% dos artigos. Como destacam Dogan et al. (2020), o aumento do consumo de energia está associado a maior desgaste ambiental, devido ao fato de que, ao intensificar a produção e atividade industrial, as economias passam a demandar e consumir mais energia, resultando em externalidades negativas ao meio ambiente. Note que, em 8% dos artigos, os autores decidiram analisar essa

relação através da proporção de energia que é produzida por fontes renováveis, indicando a proeminência da investigação sobre transição de matriz energética para fontes renováveis na literatura recente. Por outro lado, o consumo de energia a partir de fontes não renováveis foi utilizado em apenas 3% dos artigos. Observa-se, portanto, que apesar da relevância de se analisar os efeitos do consumo de energia sobre a degradação ambiental, poucos artigos têm conduzido uma análise de forma desagregada entre energias renováveis e não renováveis, o que poderia trazer insights valiosos para a literatura.

Figura 15 - Variáveis independentes mais utilizadas



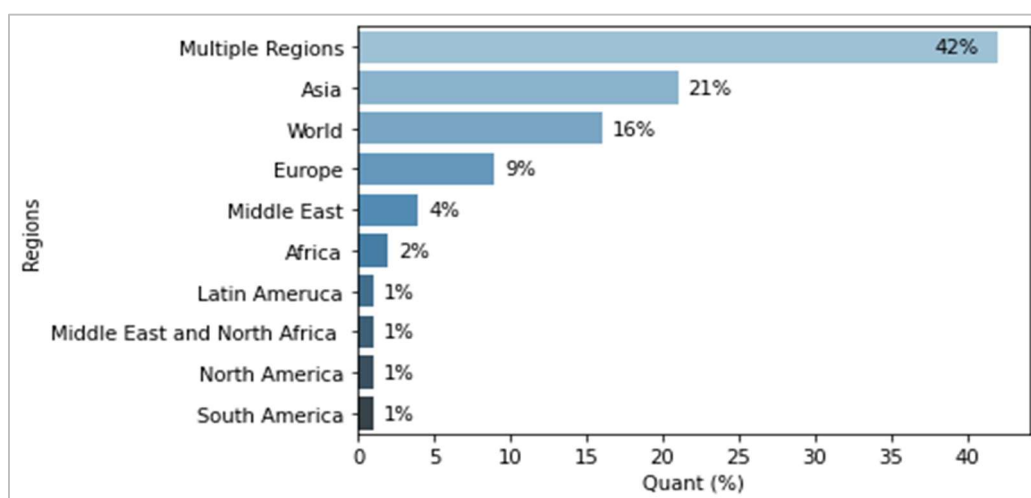
Fonte: Elaborado pelo autor

A Figura 16 exibe as áreas geográficas analisadas pela literatura. Note que 42% dos estudos avaliaram múltiplas regiões, isto é, artigos que analisaram grupos de países que se situam em diferentes continentes. Por exemplo, artigos que analisaram grupos econômicos específicos (Dogan et al., 2022; Leitão et al., 2021; Adedoyin et al., 2021; Adebayo et al., 2022), os que definiram como amostra apenas países industrializados (Kılıç et al., 2023), ou os que analisaram as economias contemporâneas mais complexas (Pata e Hizarci, 2022; Satrovic e Adedoyin, 2022; Adebayo et al., 2022). Estes estudos compõem a grande maioria da literatura selecionada, o que ressalta a relevância de se considerar um escopo amplo e ajustado à análise. Nessa mesma linha, 16% dos artigos utilizaram uma abordagem ainda mais ampla, examinando a hipótese EKC para o mundo (Dogan et al., 2019; Chu, 2020; Adedoyin et al., 2021; Liu et al., 2019), dividindo os países por níveis de renda – a saber: renda alta; renda média alta; renda média baixa e renda baixa. Essa abordagem contribui para a literatura ao investigar como as variáveis independentes impactam o meio ambiente em países de diferentes conjunturas. Além disso, considerando que a base teórica da hipótese EKC se fundamenta na relação de não linearidade entre crescimento econômico (renda) e degradação ambiental, uma análise que leve em conta países de diferentes níveis de renda pode investigar se a hipótese é válida de uma

forma mais efetiva e abrangente.

Note que algumas pesquisas são direcionadas a regiões específicas (Khezri et al., 2022; Khan et al., 2021; Murshed e Dao, 2022; Balsalobre-Lorente et al., 2023), o que pode contribuir para a literatura devido ao fato de que essas análises podem captar melhor as especificidades regionais e culturais às quais as economias estão expostas. Seguindo essa perspectiva, a Figura 14 evidencia que 21% dos artigos investigaram a hipótese EKC na Ásia, 9% na Europa e 4% no Oriente Médio. Por outro lado, menos atenção tem sido dada a outras regiões como África (2%), América Latina (1%), Oriente Médio e Norte da África (1%), América do Norte (1%) e América do Sul (1%). Observa-se uma correlação entre a China – maior emissora de CO₂ do mundo (Zheng et al., 2020) – e o volume de pesquisas realizadas, já que 21% dos artigos analisaram a teoria da EKC na Ásia, com destaque para a China, como evidenciado na Figura 15, que aponta o país como o mais estudado quanto à validade da EKC. Em contrapartida, os Estados Unidos, segundo o maior emissor de CO₂ do planeta (Kenawy et al., 2023), têm sido pouco analisado. Apenas 1% dos estudos focaram na América do Norte, e uma proporção igualmente baixa, de 1%, analisou a validade da EKC especificamente nos Estados Unidos.

Figura 16 - Áreas geográficas analisadas

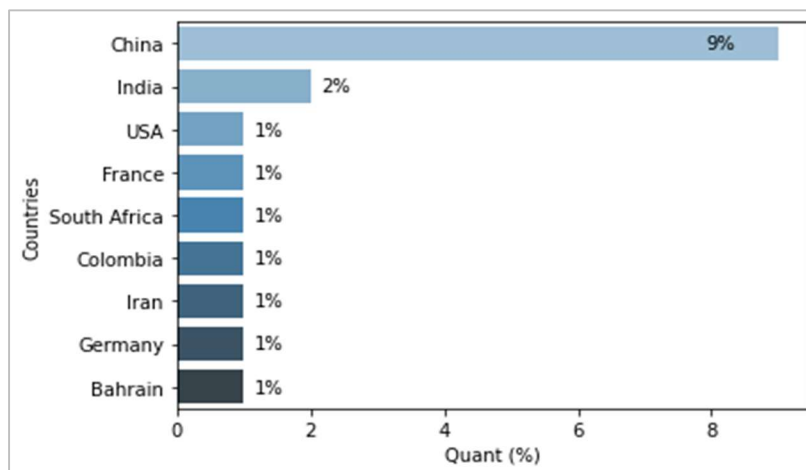


Fonte: Elaborado pelo autor

Estreitando ainda mais o escopo de análise, alguns autores conduziram estudos direcionados a países específicos. O principal país analisado foi a China, representando 9% das publicações totais. Note que há uma diferença expressiva entre o primeiro (China) e o segundo (Índia) país mais analisado, o que evidencia o crescente interesse dos pesquisadores e formuladores de política pública em investigar os impactos direcionados ao meio ambiente na China e, conseqüentemente, em países da Ásia. De forma similar, outros países também foram analisados, a saber: Estados Unidos, França, África do Sul, Colômbia, Irã, Alemanha e Barém,

cada um representando 1% do total de artigos. Apesar de as análises específicas conseguirem captar as particularidades econômicas, sociais e culturais das regiões analisadas, ao focar em um país específico, a comparação ou generalizações dos resultados para outras regiões se tornam limitadas, implicando em uma limitação comparativa dos resultados.

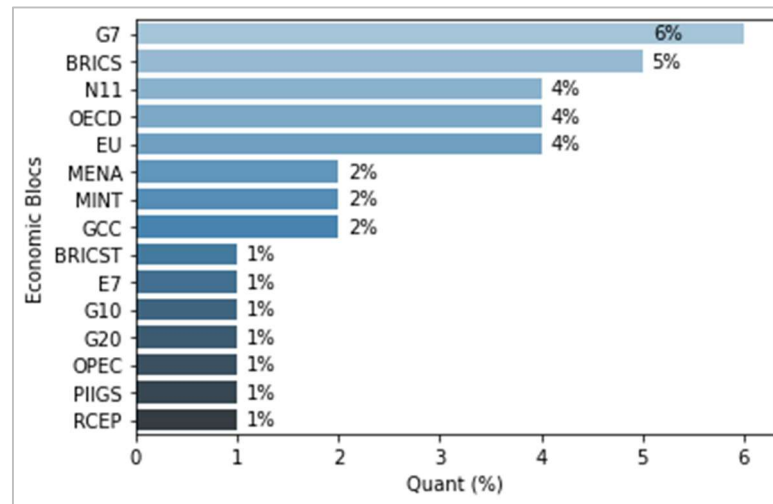
Figura 17 - Análises de países específicos



Fonte: Elaborado pelo autor

Dos artigos selecionados nesta análise, uma parte significativa conduziu uma investigação em algum bloco econômico, totalizando 39% dos artigos. Este fato evidencia a importância de análises direcionadas aos blocos, uma vez que são compostos por países que possuem aspectos econômicos, geográficos e sociais semelhantes, o que pode influenciar diretamente a trajetória do desenvolvimento econômico e do meio ambiente. Note que 6% dos artigos examinaram a hipótese da EKC nos países do G7, 5% analisaram os países do BRICS (Brasil, Rússia, Índia, China e África do Sul), 4% analisaram os países da Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico (OCDE), União Europeia e N11 (*Next Eleven*). Outros blocos importantes também foram analisados, a saber: MENA (Middle East and North Africa), MINT (México, Indonésia, Nigéria, Turquia), GCC (Gulf Cooperation Council), que correspondem, cada um, a 2% dos artigos. Já os blocos BRICST, E7, G10, G20, OPEC, PIIGS e RCEP representam, cada um, 1% dos artigos.

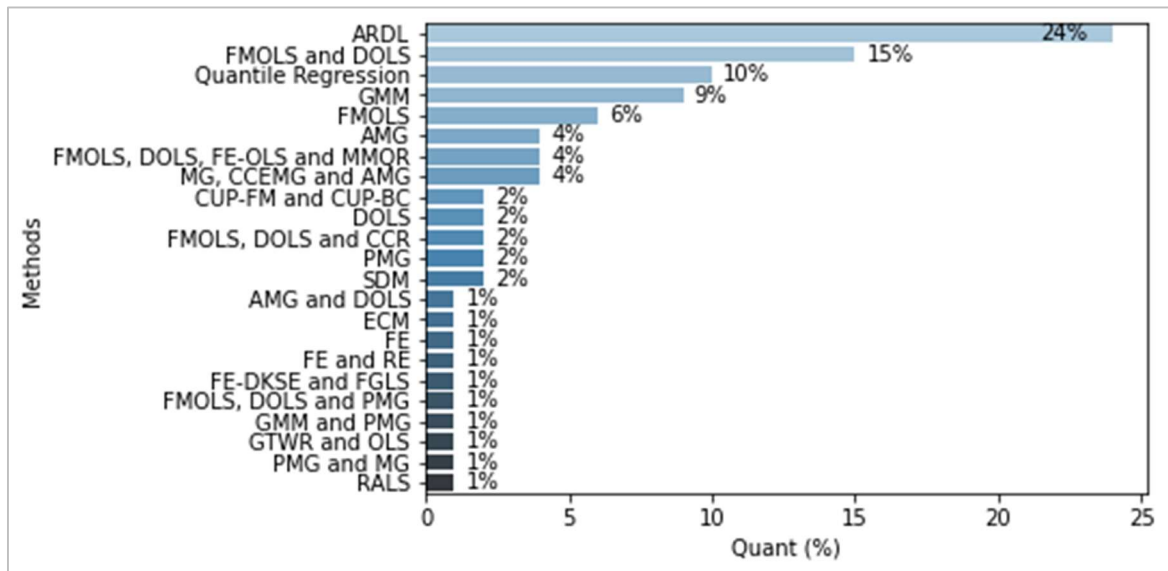
Figura 18 - Blocos econômicos analisados



Fonte: Elaborado pelo autor

A Figura 19 apresenta os principais métodos de análise empregados na literatura. Observa-se que 24% dos artigos utilizaram como principal método de estimação o ARDL. Este método é de grande relevância para essa análise, uma vez que o ARDL proporciona a investigação de relações de curto e longo prazo entre as variáveis (Kripfganz e Schneider, 2023), oferecendo informações relevantes a respeito do impacto das variáveis selecionadas sobre o meio ambiente ao longo do tempo. Assim, sua adoção proeminente na literatura reflete a complexidade da relação de curto e longo prazo entre crescimento econômico e degradação ambiental, possibilitando a geração de análises mais precisas. A segunda abordagem metodológica mais utilizada foi a combinação do FMOLS e do DOLS, sendo empregada em 15% dos artigos. O FMOLS tem a capacidade de corrigir problemas de endogeneidade e autocorrelação dos resíduos, fornecendo estimativas mais robustas dos coeficientes de longo prazo (Phillips, 1995). Já o DOLS possibilita a correção dos vieses de especificação e endogeneidade, o que permite uma maior precisão das estimativas (Kao e Chiang, 1997). A escolha pela combinação desses dois métodos reflete a necessidade da literatura de gerar análises mais robustas e confiáveis, especialmente sobre relações de longo prazo entre fatores econômicos e meio ambiente. O terceiro método mais utilizado foi a Regressão por Quantis (QR), que foi utilizada em 10% dos artigos. Esta ampla utilização se justifica pelo fato de que a QR permite que os pesquisadores examinem como as variáveis influenciam a variável dependente em diferentes quantis da distribuição, fornecendo uma análise mais detalhada e abrangente (Fitzenberger, 2015).

Figura 19 - Métodos utilizados



Fonte: Elaborado pelo autor

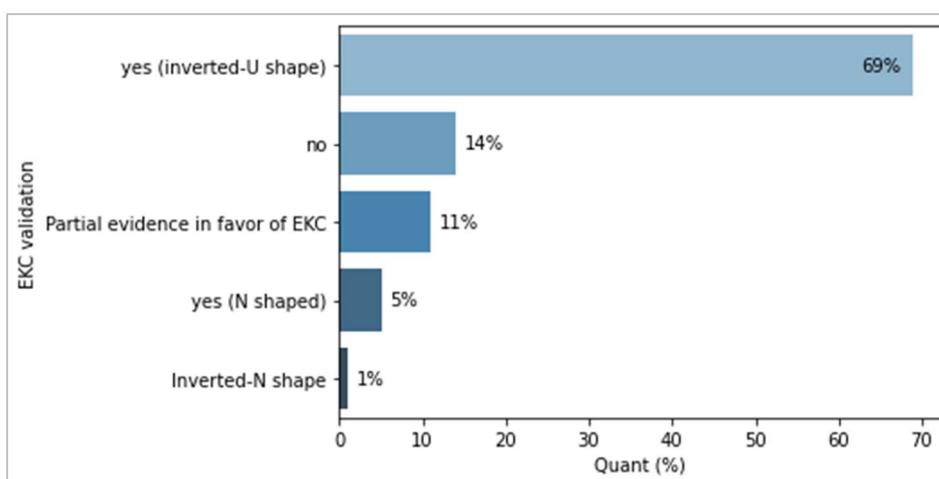
A Figura 20 apresenta se houve ou não a validação da hipótese EKC nas regiões analisadas. Observa-se que a grande maioria dos artigos (69%) validou a hipótese EKC, sugerindo uma relação em forma de “U-invertido” entre crescimento econômico – ou complexidade econômica, a depender da abordagem utilizada – e danos ao meio ambiente. Esta relação se caracteriza como o pilar central deste campo de pesquisa, proposto por Grossman e Krueger (1991), onde os estágios iniciais do desenvolvimento econômico gera aumento da deterioração ambiental e, a medida em que as economias se tornam mais desenvolvidas e complexas, tendem a adotar tecnologias mais eficientes e a promover maior consciência ambiental, o que resulta na diminuição dos danos ambientais (Can e Gozgor, 2017; Chu, 2021; Khezri et al., 2022).

No entanto, alguns autores encontraram indícios de que essa relação vai além do formato de “U-invertido” (Balsalobre-Lorente et al., 2023; Agozie et al., 2022; Balsalobre-Lorente et al., 2022), sugerindo que a interação entre desenvolvimento econômico e meio ambiente pode ser ainda mais complexa ao longo do tempo. Note que 5% dos artigos validaram a hipótese EKC indicando uma relação em formato de “N”. Esse formato sugere que, após a fase do declínio da degradação ambiental que decorre do avanço do desenvolvimento econômico, há um novo ponto de inflexão e, mesmo após atingir níveis mais altos de renda, os danos ao meio ambiente voltam a subir (Awan e Azam, 2021). De acordo com Torras e Boyce (1998), uma das possibilidades que justificariam esse fenômeno seria uma situação na qual o efeito de escala ofusque os efeitos de composição e tecnologia e, à medida que o potencial para novas melhorias

se esgotem ou que essas melhorias gerem retornos decrescentes em termos de mudanças tecnológicas que possam reduzir a poluição, haveria uma nova evolução dos níveis de degradação ambiental, caracterizando, portanto, uma relação em forma de “N”.

Alguns artigos, porém, encontraram evidência parcial para a hipótese EKC (11%). Nesse grupo, encontram-se os estudos que analisaram a validade da hipótese EKC para o mundo, dividindo os países por renda, na qual a hipótese foi validada apenas para algum ou alguns grupos de renda, e não para toda a amostra (Alvarado et al., 2021; Dogan et al., 2020; Numan et al., 2022). Compõem também esse grupo artigos que analisaram uma amostra de países específicos, na qual a hipótese EKC não foi validada para todos os países (Pata e Hizarci, 2022; Liu et al., 2018; Manga et al., 2023). Além desses, também fazem parte desse grupo os artigos que utilizaram como método a Regressão por Quantis (QR) e a hipótese EKC não pôde ser validada para todos os quantis da análise (Lee et al., 2022; Nathaniel et al., 2022).

Figura 20 - Validação da hipótese EKC



Fonte: Elaborado pelo autor

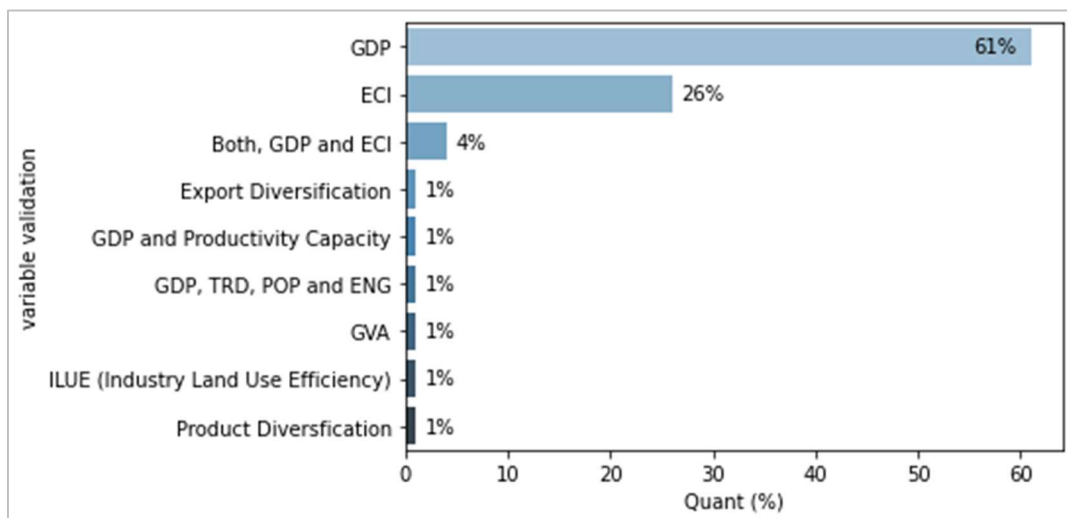
Cada artigo utilizou uma abordagem para examinar a validade da hipótese EKC. As abordagens podem variar, a depender do objetivo principal de cada pesquisador. A Figura 21 apresenta as principais variáveis utilizadas para a examinação da validade da EKC. Note que 61% dos artigos empregaram o PIB, como *proxy* para crescimento econômico, com o objetivo de examinar a EKC. Estes artigos adotaram a abordagem que se caracteriza como o *mainstream* da teoria da EKC, na qual o objetivo é avaliar a relação entre o progresso econômico e a deterioração ambiental.

Para além da abordagem fundamental da teoria, proposta por Grossman e Krueger (1991), uma nova linha de pesquisa vem se destacando, notoriamente a partir de 2017 com os estudos de Can e Gozgor (2017), na qual utiliza-se Complexidade Econômica como variável de análise para a validade da EKC. Esta abordagem vem captando interesse dos pesquisadores,

pois a Complexidade Econômica possibilita a mensuração da sofisticação produtiva e o conhecimento incorporado nos produtos que um país exporta (Hidalgo e Hausmann, 2009), o que pode oferecer uma nova perspectiva sobre a relação entre desenvolvimento e meio ambiente.

As abordagens escolhidas pelos autores não necessariamente apresentam uma base teórica disponível na literatura. Alguns dos artigos empregaram variáveis, até então, não utilizadas nesse campo teórico, gerando abordagens pioneiras na literatura. Li et al. (2021), por exemplo, utilizaram como variável de análise a Eficiência no Uso do Solo Industrial (ILUE), com o objetivo de examinar a relação entre ILUE e a poluição por micro-partículas (PM2.5). Moutinho e Madaleno (2022) empregaram como variável de análise o Valor Agregado Bruto (GVA), com o objetivo de investigar se há validação da hipótese EKC na relação entre GVA e Pegada Ecológica. Ul-Haq et al. (2023) utilizaram Diversificação de Produtos (PD) para avaliar a hipótese EKC entre PD e emissões de CO₂ e SO₂. Nota-se, portanto, que as abordagens que vão além da corrente principal deste campo teórico podem oferecer novas perspectivas e informações valiosas para a literatura, possibilitando a formação de uma base teórica mais robusta e abrangente. A inclusão de novas variáveis e abordagens não apenas enriquece a literatura, mas também pode orientar práticas e estratégias que promovam um equilíbrio entre crescimento econômico e proteção ambiental, especialmente na conjuntura contemporânea em que os desafios ambientais exigem soluções inovadoras e adaptativas.

Figura 21 - Variável de análise EKC



Fonte: Elaborado pelo autor

2.3.5. Análise dos Resultados

Os achados obtidos nessa revisão sistemática revelam que a consideração da

Complexidade Econômica e da estrutura produtiva das economias no *framework* da Curva Ambiental de Kuznets é um tema em rápida expansão, que tem recebido crescente destaque desde sua introdução na literatura, em 2017, alcançando seu ápice em 2022, com a publicação de 34 artigos. Essa rápida expansão entre os principais periódicos internacionais, com destaque para o *Environmental Science and Pollution Research*, que concentra cerca de 30% de todas as publicações, evidencia a relevância dessa abordagem teórica na compreensão dos impactos ambientais.

Três artigos desse campo de pesquisa precisam ser ressaltados. O artigo de Can e Gozgor (2017), *The impact of economic complexity on carbon emissions evidence from France*, testou a validade da hipótese EKC na França e, além disso, lançou bases para esse domínio teórico, ao introduzir a Complexidade Econômica como objeto de investigação para o *framework* da EKC. O artigo de Ugur Korkut Pata (2021), *Renewable and non-renewable energy consumption, economic complexity, CO₂ emissions, and ecological footprint in the USA: testing the EKC hypothesis with a structural break*, se destaca como o mais relevante em termos de citações. A principal contribuição deste estudo foi a utilização do Índice de Complexidade Econômica (ECI) como variável de validação da hipótese EKC. O artigo de Balsalobre Lorent Daniel et al. (2022), *The environmental Kuznets curve, based on the economic complexity, and the pollution haven hypothesis in PIIGS countries*, se revela como o segundo mais influente, em termos de citações. Assim como Ugur Korkut Pata (2021), os autores utilizaram o ECI como variável de validação da EKC; no entanto, os autores empregaram, além do termo quadrático da ECI, o termo cúbico, a fim de verificar se o formato de "U-invertido" se reverteria. Dessa forma, os autores contribuíram para a literatura ao identificar uma relação em forma de N entre desenvolvimento econômico e degradação ambiental.

A análise da rede de citações revelou quatro clusters principais. O primeiro cluster destaca a importância de análises em blocos econômicos, permitindo compreender como padrões de desenvolvimento e impactos ambientais variam em contextos socioeconômicos distintos. O segundo cluster enfoca a estrutura produtiva, destacando os impactos heterogêneos da qualidade e diversificação das exportações sobre o meio ambiente, evidenciando a relevância dessa dimensão para a literatura. O terceiro cluster é composto por artigos que utilizaram o ECI como variável de validação para a hipótese EKC, evidenciando o papel da complexidade econômica como uma métrica eficiente para medir os efeitos ambientais da atividade produtiva, demonstrando sua importância crescente na validação da hipótese EKC. Por fim, o quarto cluster, alinhado à corrente principal da EKC, incorpora os artigos que utilizaram o PIB como variável de validação da EKC, reforçando a persistência do PIB como variável explicativa

central.

Os resultados evidenciam que os estudos recentes vêm se diversificando tanto em termos de variáveis *proxy* para a degradação ambiental – como a crescente relevância da Pegada Ecológica nos últimos anos – quanto em abordagens metodológicas, sendo os métodos ARDL, FMOLS/DOLS e Regressão por Quantis os mais utilizados. Além disso, essa pesquisa aponta que, apesar do predomínio do PIB como variável explicativa, o ECI tem ganhado relevância crescente, sobretudo após 2022, refletindo a sofisticação da estrutura produtiva como um importante preditor dos impactos ambientais. A Tabela 2 sintetiza as principais lacunas de pesquisa levantadas nesse estudo. Essas questões podem oferecer uma agenda promissora para futuras pesquisas.

Tabela 2 - Lacunas de pesquisa

Categoria	Lacunas
Teoria	<i>G1. Faltam estudos que integrem dimensões sociais, como educação e saúde, na análise da EKC;</i> <i>G2. Embora os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) sejam ocasionalmente citados, poucos estudos analisam como mudanças econômicas estruturais e avanços tecnológicos se alinham ao cumprimento dos ODS no contexto da EKC;</i>
Temas ausentes	<i>G3. Há uma escassez de análises que vão além das emissões de CO₂ como proxy para degradação ambiental;</i> <i>G4. Poucos estudos exploram a EKC nas regiões América Latina, África e Oriente Médio, o que limita o entendimento sobre as dinâmicas específicas dessas áreas geográficas e econômicas;</i> <i>G5. Escassez de estudos que investiguem o papel de inovações tecnológicas, indústria e desenvolvimento financeiro no arcabouço teórico da EKC;</i>
Metodologia e Dados	<i>G6. Poucos artigos têm utilizado indicadores compostos para degradação ambiental que considere diferentes dimensões ambientais;</i> <i>G7. Escassez de artigos que utilizem múltiplos métodos para estimar os determinantes da degradação ambiental e validade da EKC;</i> <i>G8. Carência de estudos que analisam o impacto de interações entre variáveis;</i> <i>G9. Poucos estudos analisam variáveis institucionais que captam o papel da qualidade e eficiência governamental;</i>
Escopo Geográfico	<i>G10. Há uma escassez de estudos comparativos entre economias desenvolvidas e em desenvolvimento;</i> <i>G11. Faltam estudos comparativos entre blocos econômicos globais (ex.: BRICS) e blocos regionais (ex.: UE ou GCC).</i>

Fonte: Elaborado pelo autor

Sob a perspectiva do escopo geográfico, os resultados apontam que as análises direcionadas a blocos econômicos, que representaram 39% dos estudos, reforçam a relevância de investigar padrões específicos em contextos socioeconômicos semelhantes. Adicionalmente, o estudo evidencia que 21% dos estudos concentram as investigações na Ásia, principalmente na China, enquanto menor atenção tem sido direcionada a regiões como África, América Latina e Oriente Médio. Esse desequilíbrio sugere lacunas importantes para estudos futuros, especialmente em regiões menos exploradas.

Em termos de validação da hipótese EKC, verificou-se que 69% dos estudos validaram a hipótese EKC, sugerindo uma relação em "U-invertido" entre crescimento econômico ou complexidade econômica e impactos ambientais, enquanto outros trabalhos indicaram padrões mais complexos, como o formato em "N" para essa relação. Por outro lado, 11% dos artigos encontraram apenas evidência parcial da hipótese EKC e 14% dos estudos não validaram a hipótese EKC. Esses dados ressaltam a necessidade de incorporar perspectivas multidimensionais e métodos avançados para capturar as nuances dessa relação.

2.4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A presente pesquisa revelou uma importante lacuna na literatura ao identificar a ausência de revisões sistemáticas que integrem a hipótese da Curva Ambiental de Kuznets e Complexidade Econômica. Com o objetivo de preencher essa lacuna, este estudo conduziu uma Revisão Sistemática da Literatura que possibilitou o mapeamento das principais técnicas de pesquisa, áreas geográficas, periódicos e autores mais relevantes que abordaram a interação entre Complexidade Econômica e a teoria da EKC. Ao preencher essa lacuna, esta pesquisa contribui para a literatura ao fornecer uma compreensão mais aprofundada das interações entre desenvolvimento econômico, base produtiva e meio ambiente.

Os resultados também revelaram algumas lacunas relevantes, como a escassez de estudos que integrem variáveis sociais e institucionais, que explorem regiões sub-representadas (América Latina, África e Oriente Médio) e que adotem indicadores compostos capazes de capturar múltiplas dimensões da degradação ambiental. Além disso, as evidências encontradas indicam que há espaço para avanços metodológicos por meio de estudos que combinem diferentes técnicas de estimação, incorporem interações entre variáveis e realizem comparações entre diferentes tipos de economias e blocos econômicos.

Dessa forma, este estudo contribui para a literatura ao mapear a evolução e as tendências de pesquisa sobre o nexos entre complexidade econômica e degradação ambiental no contexto da EKC, oferecendo subsídios para agendas futuras que busquem análises mais integradas,

metodologicamente robustas e geograficamente abrangentes. Os achados desta pesquisa reforçam a importância de incorporar a complexidade econômica às investigações sobre a Teoria da Curva Ambiental de Kuznets, uma vez que essa perspectiva metodológica possibilita uma compreensão mais aprofundada da relação entre desenvolvimento econômico e meio ambiente. Ademais, a adoção de uma abordagem multidimensional, que contemple aspectos econômicos, produtivos, institucionais e sociais, tende a ampliar a capacidade analítica e a efetividade na formulação de políticas públicas, favorecendo estratégias mais alinhadas aos princípios do desenvolvimento sustentável.

3. ARTIGO 2: DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL E POLÍTICAS PÚBLICAS COMBINADAS: UMA ANÁLISE DA COMPLEXIDADE ECONÔMICA, INOVAÇÃO E FINANÇAS SOB A ÓTICA DA CURVA AMBIENTAL DE KUZNETS

3.1. INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, a preocupação com a preservação ambiental e os impactos das mudanças climáticas tem se intensificado em escala global (Mania, 2019). A degradação ambiental, impulsionada por atividades econômicas intensivas em recursos naturais e energia, tornou-se um dos maiores desafios contemporâneos (Huang e Ren, 2024). A crescente urbanização, a expansão industrial e o aumento do consumo energético têm ampliado as pressões sobre os ecossistemas e intensificado as emissões de gases poluentes (Ye et al., 2023). Nesse cenário, compreender a relação entre desenvolvimento econômico e qualidade ambiental se tornou essencial para a formulação de políticas que promovam crescimento sustentável e minimizem os impactos negativos sobre o meio ambiente (Dogan et al., 2020).

Embora as mudanças climáticas possuam componentes naturais, há amplo consenso de que elas estão fortemente associadas à ação humana e ao avanço econômico das nações (Liu et al., 2019). O ritmo acelerado de crescimento econômico tem levado ao aumento do consumo de energia, sobretudo de fontes não renováveis, resultando em maior emissão de gases de efeito estufa e em diversos problemas ambientais (Can e Gozgor, 2017). O uso intensivo dessas fontes energéticas é um dos principais vetores da deterioração da qualidade ambiental, uma vez que contribui diretamente para o aquecimento global e a desestabilização dos sistemas ecológicos (Friedl e Getzner, 2003). Diante disso, controlar as emissões poluentes e promover uma transição para matrizes energéticas mais limpas são medidas fundamentais para evitar desequilíbrios irreversíveis na biosfera (Jayanthakumaran et al., 2012).

Por essa razão, os formuladores de políticas públicas vêm tentando equilibrar crescimento e desenvolvimento econômico, ao mesmo tempo em que buscam reduzir os impactos negativos sobre o meio ambiente decorrentes do alto consumo de energia (Saboori e Sulaiman, 2013). Adicionalmente, os crescentes desastres provocados por mudanças climáticas e pelo aquecimento global reforçam a relevância da complexa relação entre o crescimento econômico e o meio ambiente (Jayanthakumaran e Liu, 2012). Nesse contexto, os debates sobre o papel do crescimento econômico sobre a degradação ambiental vêm se expandindo rapidamente (Copeland e Taylor, 2004; Dogan et al., 2020). A teoria da Curva Ambiental de

Kuznets tem sido a principal abordagem aplicada para explorar a relação entre o crescimento econômico e o meio ambiente, tendo utilizado diversas *proxies* para demonstrar deterioração ambiental, regiões e períodos de análise (Doga et al., 2020).

A hipótese da EKC é um dos modelos mais influentes na análise da relação entre as condições ambientais e o crescimento econômico (Liu et al., 2019). Esta hipótese, proposta por Grossman e Krueger (1995), sugere que a relação entre o nível econômico e a qualidade ambiental varia conforme o estágio do desenvolvimento econômico (Chen et al., 2018). Mais especificamente, essa teoria propõe que, nos estágios iniciais do desenvolvimento econômico, há um aumento da degradação ambiental, mas, à medida que a economia cresce, os danos ambientais começam a diminuir, promovendo maior qualidade ambiental. Panayotou (1993) ainda acrescenta que altos níveis de desenvolvimento podem induzir melhores regulamentações ambientais, tecnologias mais verdes e maiores gastos públicos voltados à proteção ambiental. Em síntese, a teoria da EKC sugere que a relação entre a economia e a degradação ambiental segue um formato em “U invertido”.

Entre os diversos estudos que investigaram essa relação, nota-se que duas variáveis são imprescindíveis: as *proxies* de deterioração ambiental e as variáveis de captação do crescimento econômico. Tradicionalmente, a literatura tem utilizado o Produto Interno Bruto (PIB) como variável de crescimento econômico. Hidalgo (2011) argumenta que essa “abordagem de produção agregada” para explicar o crescimento econômico e o processo de desenvolvimento de um país não é precisa. O autor argumenta que esta visão tradicional considera apenas dois fatores para o crescimento da economia: capital e trabalho. No entanto, Hidalgo e Hausmann (2009) defendem que o processo produtivo necessita de fatores que vão além do capital e do trabalho, como infraestrutura, direitos de propriedade, regulamentações e mão de obra qualificada. Nesse sentido, Hidalgo e Hausmann (2009) introduzem um novo conceito para medir o desenvolvimento econômico de forma mais holística: o Índice de Complexidade Econômica (ECI).

O ECI é um indicador que visa incorporar as características produtivas de um sistema econômico, considerando as capacidades de um país (Hausmann et al., 2011). Seu cálculo se baseia nos dados de exportação dos países, analisando a complexidade da cesta de produtos que cada economia exporta. Portanto, é possível considerar que o ECI é um indicador de conhecimento, habilidade e sofisticação da estrutura produtiva de um país (Can e Gozgor, 2017). Em outros termos, a complexidade econômica pode ser entendida como medida de transformação de uma economia, com a capacidade de representar o envolvimento da manufatura produtiva com o conhecimento tecnológico (Can e Gozgor, 2017).

Diante disso, a presente pesquisa busca responder à seguinte questão: de que maneira a complexidade econômica, a inovação tecnológica e o desenvolvimento financeiro interagem para influenciar a degradação ambiental, no contexto da hipótese da Curva Ambiental de Kuznets, e como tais interações podem subsidiar a formulação de estratégias públicas combinadas voltadas ao desenvolvimento sustentável. Assim, o principal objetivo desse trabalho é examinar o papel da Complexidade Econômica sobre a degradação ambiental, bem como investigar como a interação entre desenvolvimento financeiro e inovação tecnológica impacta as emissões poluentes. considerando

A contribuição teórica desta pesquisa consiste em aprofundar a compreensão dos vínculos entre complexidade econômica e qualidade ambiental, incorporando variáveis emergentes na teoria da EKC, como tecnologia e desenvolvimento financeiro, que permitem uma análise mais abrangente dessa relação, conforme sugerem Toumi (2025) e Latif et al. (2023). Além disso, considerou-se o impacto de variáveis institucionais, ainda pouco exploradas na literatura, mas de grande relevância para a análise da EKC (Padhan et al., 2023). No campo metodológico, a pesquisa propõe o uso de um modelo econométrico que integra variáveis emergentes e suas interações, de modo a possibilitar a identificação de efeitos conjuntos, e não apenas de impactos diretos, em consonância com as recomendações de Hossain et al. (2023). Adicionalmente, incorpora-se a técnica de clusterização pelo método K-means como estratégia complementar para capturar heterogeneidades estruturais entre grupos de países, permitindo a estimação de modelos específicos para subconjuntos relativamente homogêneos da amostra e reduzindo possíveis vieses decorrentes da análise agregada. Quanto à dimensão prática, o presente estudo oferece evidências empíricas capazes de subsidiar a formulação de políticas públicas, que combinem incentivos multidimensionais como instrumentos para reduzir as emissões poluentes, alinhando-se às recomendações de Bretschger e Valente (2023) sobre a importância de políticas coordenadas que conciliem crescimento econômico e preservação ambiental.

Por fim, o estudo está estruturado da seguinte forma: a Seção “Fundamentação Teórica” apresenta a revisão da literatura, com ênfase nos estudos recentes acerca da hipótese da EKC e de sua interface com variáveis estruturais e institucionais relevantes. A Seção “Método e Dados” descreve a base de dados utilizada e os procedimentos metodológicos adotados. Na Seção “Resultados e Discussão”, são expostos e analisados os achados empíricos, bem como suas implicações políticas. Por fim, a Seção “Considerações Finais” sintetiza as principais conclusões do estudo.

3.2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Recentemente, a literatura sobre a Curva Ambiental de Kuznets vem se expandindo significativamente, com um número crescente de estudos dedicados a investigar a relação entre o desenvolvimento econômico e os danos ambientais. Para organizar de maneira mais clara os resultados encontrados na literatura, o referencial teórico deste estudo foi estruturado em seis partes: 1) relação entre crescimento econômico e meio ambiente; 2) Complexidade Econômica e degradação ambiental; 3) inovações tecnológicas e impactos ambientais; 4) consumo de energia e meio ambiente; 5) qualidade regulatória e impactos ao meio ambiente; e 6) desenvolvimento financeiro e qualidade ambiental.

3.2.1. Relação entre Crescimento Econômico e Meio Ambiente

O arcabouço teórico que fundamenta a teoria da EKC, proposta por Grossman e Krueger (1995), é o caminho seguido por diversos artigos que testaram a validade da hipótese EKC em diferentes economias (Can e Gozgor, 2017; Yilanci e Pata, 2020; Dogan et al., 2019). Isto porque essa teoria sustenta que o crescimento da renda impacta diretamente os níveis de qualidade ambiental (Grossmann e Krueger). Esse aspecto torna-se evidente ao observar que as mudanças climáticas registradas nos últimos anos têm sido influenciadas principalmente pelas emissões de gases de efeito estufa (Baumert et al., 2005), com os esforços dos países para impulsionar o crescimento econômico sendo os principais fatores responsáveis pelo aumento dessas emissões (Dogan et al., 2019).

Entretanto, estudos recentes sobre a EKC evidenciam que, à medida que as economias alcançam estágios mais avançados de desenvolvimento, observa-se um estímulo à adoção de tecnologias mais limpas e eficientes. Esse processo pode possibilitar a reversão dos impactos negativos iniciais do crescimento sobre o meio ambiente, promovendo melhorias na qualidade ambiental (Can e Gozgor, 2017). Nesse sentido, a análise da relação entre crescimento econômico e degradação ambiental torna-se essencial para compreender a dinâmica entre economia e sustentabilidade, ponto central da teoria da EKC.

Dogan et al. (2019) reforçam essa abordagem ao investigarem a hipótese da EKC com base na relação entre o PIB e as emissões de CO₂ em 55 países, entre 1971 e 2014. Utilizando dados em painel e modelo de efeitos fixos, os autores identificaram que o PIB exerce um efeito positivo sobre as emissões, especialmente em países de alta renda. O termo quadrático do PIB apresentou sinal negativo, validando a existência de uma relação em formato de "U invertido" entre crescimento econômico e meio ambiente. Por outro lado, os resultados para os países de renda média baixa e baixa revelaram-se heterogêneos, o que impossibilita a validação da EKC

nesses contextos.

Em consonância, Can e Gozgor (2017) analisaram a relação entre o PIB e a degradação ambiental na França, utilizando o método de estimação Dynamic Ordinary Least Squares (DOLS) no período de 1964 a 2014. Os autores observaram que o PIB contribui para o aumento das emissões de CO₂, enquanto o termo quadrático do PIB exerce efeito negativo, validando a EKC em formato de "U invertido" para a França.

Em países em desenvolvimento, o mesmo padrão foi identificado por Adebayo et al. (2022), que examinaram a validade da EKC no bloco MINT – México, Indonésia, Nigéria e Turquia – no período de 1990 a 2018. Utilizando três métodos de estimação distintos (FMOLS, DOLS e Efeitos Fixos), os autores constataram que o crescimento do PIB está associado ao aumento das emissões, enquanto o termo quadrático do PIB contribui para sua redução, confirmando a relação de "U invertido" em economias emergentes.

No entanto, alguns autores encontraram evidências de que a interação entre a economia e a degradação ambiental segue uma relação inversa. Ahmed et al. (2021), por exemplo, analisaram a hipótese EKC para os países do G7, com base em dados de 1985 a 2017. Os resultados mostraram que o PIB impacta negativamente a Pegada Ecológica, enquanto o termo quadrático tem efeito positivo, indicando uma relação em formato de "U". Segundo os autores, esse padrão pode ser explicado pelo fato de que, embora os países do G7 disponham de recursos para manter certo nível de sustentabilidade ambiental, um aumento contínuo da renda pode levar a uma intensificação do consumo de recursos naturais, revertendo os ganhos ambientais.

Pata et al. (2022) corroboram com Ahmed et al (2021) ao analisarem a hipótese EKC para Índia entre 1965 e 2014. Os resultados evidenciaram que o PIB reduz a Pegada Ecológica, enquanto o termo quadrático de PIB a eleva, confirmando a relação em forma de "U". Os autores argumentam que a Índia ainda está em processo de industrialização e, por isso, ainda não atingiu o nível de desenvolvimento necessário para que os benefícios ambientais do crescimento econômico superem seus impactos negativos (Pata et al, 2022).

Há ainda uma recente corrente na literatura na qual argumenta-se que a relação em forma de "U" invertido não se mantém no longo prazo, sugerindo uma relação ainda mais complexa (Balsalobre-Lorente et al., 2022; Agozie et al., 2022). Os autores dessa corrente defendem que, por mais que ocorra uma redução da degradação ambiental por meio do progresso econômico, quando os efeitos técnicos e de composição decorrentes da industrialização são superados pelos efeitos de escala, os danos ambientais tendem a voltar a subir, o que gera uma relação em forma de "N" (Torras e Boyce, 1998). Para capturar essa interação, os autores incluem não apenas o termo quadrático, mas também o termo cúbico do

PIB.

Awan e Azam (2021) corroboram com Torras e Boyce (1998) ao testarem a validade da EKC em formato de "N" para os cinco países do G20 mais afetados pela degradação ambiental. Os resultados revelaram que o PIB apresenta efeito positivo, o termo quadrático efeito negativo, e o termo cúbico efeito positivo sobre as emissões de carbono, validando a EKC em formato de "N". Resultados semelhantes foram encontrados por Alvarez et al. (2017) que, ao analisarem dados de 17 países do OCDE entre 1990 a 2012, constataram que o PIB e PIB ao cubo contribuem para o aumento das emissões poluentes enquanto o PIB ao quadrado contribui para a redução, validando o formato de "N" para os países do OCDE.

Esses resultados evidenciam que a relação entre o crescimento econômico e a qualidade ambiental não é homogênea. Enquanto alguns estudos validam a EKC em formato de "U invertido" em economias desenvolvidas (Dogan et al., 2019), outros indicam padrões divergentes, como a relação em formato de "U" (Ahmed et al., 2021) ou de "N" (Awan e Azam, 2021), desafiando a hipótese tradicional. Essas evidências indicam que, embora o progresso econômico possa fomentar inovações tecnológicas sustentáveis, ele também pode intensificar o uso de recursos naturais, dificultando o equilíbrio entre crescimento e preservação ambiental. Diante desse contexto e com base nas evidências apresentadas pela literatura, propõe-se a seguinte hipótese:

Hipótese 1 (H₁): *A relação entre o crescimento econômico e a degradação ambiental segue o formato de "U invertido".*

3.2.2. Complexidade Econômica e Degradação Ambiental

Para além da abordagem convencional, Hidalgo e Hausmann (2009) argumentam que o indicador de produção agregada não é capaz de capturar o desenvolvimento econômico de forma holística. Can e Gozgor (2017) corroboram com Hidalgo e Hausmann (2009) ao apontarem que um alto nível de renda não reproduz a estrutura produtiva de toda uma economia. É nesse contexto que o Índice de Complexidade Econômica (ECI) emerge como uma métrica alternativa e relevante, ao mensurar, de forma mais precisa, as capacidades produtivas e tecnológicas de um país (Hausmann et al., 2011).

O ECI, ao mensurar a cesta de produtos exportados por um país, incorpora a qualidade e a sofisticação de sua estrutura produtiva. Economias com maior complexidade tendem a produzir bens mais diversificados e intensivos em conhecimento, o que pode impulsionar a inovação e a eficiência produtiva (Mealy & Teytelboym, 2020). No entanto, alguns

pesquisadores têm apontado que o aumento da complexidade econômica pode também gerar efeitos adversos ao meio ambiente (Yilanci e Pata, 2020; Dogan et al., 2019). Diante disso, diversos estudos têm investigado de forma mais aprofundada os efeitos ambientais decorrentes do avanço da complexidade econômica.

Can e Gozgor (2017) foram pioneiros ao introduzirem a complexidade econômica como variável explicativa no arcabouço teórico da EKC. Ao analisarem dados da França entre 1964 e 2014 por meio do método DOLS, os autores constataram que o aumento da complexidade econômica está associado à redução das emissões de CO₂. Os autores evidenciam que o aumento unitário no ECI promove uma diminuição de aproximadamente 7,26 toneladas per capita de CO₂. Em consonância, Leitão et al. (2021) encontraram resultados semelhantes para países em desenvolvimento. Analisando dados de 1990 a 2015 para os países do BRICS, observaram que o aumento da complexidade econômica contribui para a redução das emissões de carbono, reforçando a hipótese de que a sofisticação produtiva pode promover melhorias ambientais em diferentes contextos.

Por outro lado, Yilanci e Pata (2020), ao analisarem dados da China entre 1965 e 2016 por meio do modelo ARDL, observaram que o aumento da complexidade econômica agrava a Pegada Ecológica. Resultados semelhantes foram encontrados por Adebayo et al. (2022), ao examinarem a hipótese EKC nas oito economias mais complexas do mundo. Com base em dados de 1993 a 2018, os autores constataram que o aumento do ECI induz a um aumento das emissões poluentes nos quatro modelos empregados. Mais precisamente, o modelo MMQR evidenciou que o efeito de ECI sobre as emissões de CO₂ é positivo e significativo em todos os quartis. Os autores explicam que essa relação positiva pode ser atribuída ao fato de que tecnologias obsoletas influenciam a produtividade econômica e, conseqüentemente, aumentam a intensidade e a demanda energética.

Essa ambiguidade evidencia que a relação entre ECI e meio ambiente é complexa e necessita de investigações mais abrangentes. Nesse sentido, alguns autores propõem uma abordagem ampliada, examinando como a complexidade econômica pode interferir na qualidade ambiental em diversos países, dividindo-os por nível de renda (Alvarado et al., 2021; Dogan et al., 2019; Adedoyin et al., 2021). Numan et al. (2022), por exemplo, analisando dados de 85 países entre 2001 e 2020, verificaram que, em países de alta renda, o ECI contribui para a redução da pegada ecológica enquanto, em países de renda média alta e renda média baixa, a complexidade econômica causa deterioração ambiental. De forma semelhante, Dogan et al. (2019) analisaram 55 economias entre 1971 e 2014 e constataram que, em países de alta renda, a complexidade econômica contribui para a redução das emissões de carbono, enquanto em

países de renda média-alta e média-baixa, o efeito é oposto. Os autores apontam que essa diferença ocorre devido à maior capacidade dos países desenvolvidos de converter complexidade em inovação verde e diversificação produtiva sustentável, ao passo que economias de renda média e baixa permanecem dependentes de setores intensivos em emissões e com baixo valor agregado.

Nota-se, portanto, que os impactos ambientais associados à complexidade econômica estão intimamente relacionados ao estágio de desenvolvimento, à trajetória tecnológica e às estratégias produtivas adotadas por cada país. Esses aspectos refletem o papel das estruturas produtivas na capacidade das economias de gerar inovações tecnológicas mais eficientes e ambientalmente sustentáveis. Assim, a incorporação de variáveis que capturem as especificidades produtivas revela-se essencial para o aprofundamento da literatura sobre a Curva Ambiental de Kuznets, ao permitir uma compreensão mais ampla sobre como as capacidades produtivas moldam o caminho para a sustentabilidade. Dessa forma, propõe-se a seguinte hipótese de pesquisa:

Hipótese 2 (H₂): *A elevação da complexidade econômica está associada à redução da degradação ambiental.*

3.2.3. Inovações Tecnológicas e Impactos Ambientais

O avanço tecnológico tem se consolidado como um importante indutor do desenvolvimento econômico nas últimas décadas, promovendo ganhos significativos em eficiência produtiva (Yu et al., 2022). Paralelamente, as inovações tecnológicas têm desempenhado um papel fundamental na mitigação dos impactos ambientais, especialmente por meio de soluções sustentáveis (Khan et al., 2021; Adebayo et al., 2022). Apesar de a influência da tecnologia sobre o crescimento econômico dos países ser amplamente reconhecida, ela é comumente caracterizada como um fenômeno de natureza ambígua, em razão de seus potenciais impactos positivos e negativos sobre o meio ambiente (Ahmed e Le, 2021; Raheem et al., 2020).

Se por um lado a transformação tecnológica tem a capacidade de promover maior qualidade ambiental através de inovações verdes e melhorias na eficiência produtiva e energética (Mehrjo et al., 2022), por outro, pode intensificar o uso de recursos naturais e elevar os níveis de poluição ambiental (Hargroves e Smith, 2005; Mehrjo et al., 2022). Nota-se, portanto, que a interação entre tecnologia e meio ambiente é uma questão complexa e multidimensional que precisa ser investigada (Mehrjo et al., 2022; Hargroves e Smith, 2005).

Note que a tecnologia tem desempenhado papel decisivo na transição energética por meio da substituição de fontes fósseis por alternativas renováveis. A queda nos custos de produção e armazenamento de energia solar, eólica e de biomassa, impulsionada por avanços em pesquisa, tem viabilizado uma matriz mais limpa e eficiente (Irena, 2020; Tzeremes et al., 2023). Além disso, a digitalização de bens e serviços — reduzindo necessidades logísticas e de insumos físicos — contribui para um menor consumo de energia e de matérias-primas, resultando em emissões mais baixas e melhor qualidade ambiental (Mehrjo et al., 2022).

Por outro lado, a crescente evolução tecnológica tem intensificado a atividade econômica e acelerado a industrialização, gerando uma elevação no consumo de energias e piora da qualidade ambiental (Dauda et al., 2021). Além disso, a produção em massa de dispositivos eletrônicos tende a intensificar o consumo de energias e recursos naturais, além de gerar um aumento de resíduos descartados no meio ambiente, devido ao curto ciclo de vida destes equipamentos (Mehrjo et al., 2022). Essa dinâmica aumenta a pressão ambiental, tanto pelo consumo de matérias-primas não renováveis quanto pelos impactos relacionados ao descarte inadequado de lixo eletrônico, que contém substâncias nocivas ao meio ambiente (Cuchiella et al., 2015).

Estudos empíricos ilustram essa dualidade. Rahman et al. (2022), ao aplicarem NARDL a 22 economias avançadas de 1990 a 2018, verificaram que choques positivos em P&D reduzem significativamente as emissões de CO₂, enquanto choques negativos as elevam. Adebayo et al. (2022), analisando dados de 1993 a 2018, encontraram evidências semelhantes em países de alto nível de complexidade econômica. Os autores constataram que o aumento de 1% em tecnologia possibilita uma redução de até 0,05% nas emissões de dióxido de carbono.

Resultados semelhantes também foram observados em economias emergentes. Com base em dados da África do Sul entre 1960 e 2020, Udeagha e Muchapondwa (2022) constataram uma relação negativa entre tecnologia e emissões de carbono tanto no curto quanto no longo prazo. De forma convergente, Yu et al. (2022), ao analisarem dados de 1980 a 2020, demonstraram que as inovações tecnológicas desempenham um papel relevante na mitigação das emissões de CO₂ nos países do bloco N11. Um aumento de 1% em inovações tecnológicas provoca uma redução de 0,02% nas emissões de carbono dos países do N11 (Yu et al., 2022).

Por outro lado, Dauda et al. (2021), ao examinarem nove países africanos entre 1990 e 2016, encontraram efeitos mistos para o aumento da tecnologia. Os autores constataram que, a depender do contexto dos países, o aumento das inovações tecnológicas pode estar associado a um crescimento das emissões de CO₂. Resultados mais contundentes foram encontrados por Usman e Hammar (2021). Ao investigarem os países da Cooperação Econômica Ásia-Pacífico

no período de 1990 a 2017, os autores concluíram que o aumento de 1% na inovação tecnológica resulta em impacto negativo sobre a qualidade ambiental de 0,99% no longo prazo.

Em consonância, Chen e Lee (2020), com base em dados de 96 países entre 1996 a 2018, evidenciaram que, a nível global, as inovações tecnológicas não possuem efeito mitigatório sobre as emissões de CO₂. Os autores demonstraram que, enquanto a tecnologia pode reduzir as emissões em países de alta renda e alto nível tecnológico, em países com baixo nível tecnológico e baixo nível de emissões, o efeito é contrário. Esses achados reforçam a heterogeneidade dos efeitos da tecnologia sobre o meio ambiente, evidenciando a importância de maiores investigações sobre a interação entre tecnologia e qualidade ambiental.

Diante dessas constatações, nota-se que a literatura reconhece as inovações tecnológicas como instrumentos essenciais na agenda de sustentabilidade, embora ressalte que seus impactos sobre a qualidade ambiental não são uniformes, podendo variar conforme o estágio de desenvolvimento dos países, condições institucionais e direcionamento das tecnologias adotadas (Khan et al., 2020; Mehrjo et al., 2022). Portanto, compreender a interação entre tecnologia e meio ambiente exige investigações integradas que capturem dimensões tecnológicas, regulatórias e econômicas para uma análise mais holística. Diante das evidências apresentadas, formula-se a seguinte hipótese:

Hipótese 3 (H₃): *As inovações tecnológicas contribuem para reduzir a degradação ambiental.*

3.2.4. Consumo de Energia e Meio Ambiente

O crescimento das atividades econômicas e industriais tem demandado, de forma contínua, maiores quantidades de energia, o que tem configurado o consumo energético como um dos principais impulsionadores do desenvolvimento contemporâneo (Khaliq & Mamkhezri, 2023). No entanto, esse avanço também traz implicações ambientais significativas, já que a intensificação do uso de energia está fortemente associada ao aumento da poluição e à piora da qualidade ambiental (Yilanci & Pata, 2020). Como apontado por Dogan et al. (2020), embora a expansão da disponibilidade energética favoreça o crescimento econômico, seu uso indiscriminado, especialmente oriundo de fontes fósseis, resulta em elevados níveis de emissões de dióxido de carbono.

Nesse contexto, diversos estudos têm investigado a relação entre o consumo energético e a degradação ambiental, corroborando a hipótese de que o aumento do uso de energia, sobretudo de fontes não renováveis, representa um vetor crítico da deterioração ambiental (Can & Gozgor, 2017; Pata, 2021). Adedoyin et al. (2017), por exemplo, ao analisarem os países da

União Europeia entre 1995 e 2018 por meio do método GMM, observaram que um acréscimo de 1% no consumo de energia resulta em um aumento de 0,03% nas emissões de CO₂. De maneira similar, Murshed e Dao (2022) identificaram que nos países asiáticos, esse mesmo aumento de 1% no consumo agregado de energia gera um crescimento de 1,96% nas emissões de CO₂, reforçando a magnitude do impacto ambiental em economias em desenvolvimento.

A predominância de fontes não renováveis na matriz energética global permanece como um importante vetor dos efeitos negativos ao meio ambiente (Balsalobre-Lorente, 2022). Diante disso, a transição para fontes de energia renováveis tem sido apontada na literatura como uma das estratégias mais promissoras para mitigar estes impactos (Dogan et al., 2022; Pata, 2021; L. K. Chu, 2020; Dogan et al., 2022). Energias renováveis, como a solar, eólica e hidrelétrica, são reconhecidas por sua natureza limpa, sustentável e inesgotável (Pata, 2021), e sua adoção em larga escala tende a promover ganhos em segurança energética e na qualidade ambiental (Ben Jebli et al., 2016).

Diversos estudos empíricos têm confirmado os efeitos benéficos do consumo de energia renovável na redução das emissões poluentes (Iman Ai-Ayouty, 2023; Dogan et al., 2022; Khan et al., 2021). Balsalobre-Lorente et al. (2022), ao examinarem os países do grupo PIIGS, demonstraram que um aumento de 1% no consumo de energias renováveis está associado a uma queda de 0,32463% (modelo 1), 0,09650% (modelo 2), 0,25304% (modelo 3) e 0,08664% (modelo 4) nas emissões de CO₂. De forma semelhante, Leitão et al. (2021) analisaram os países do BRICS entre 1990 e 2015 e verificaram, por meio dos métodos FE, FMOLS e DOLS, que o crescimento de 1% no consumo de energia renovável reduziu as emissões de CO₂ em até 1,681%. A robustez dos resultados foi ainda confirmada por meio de um modelo de regressão por quartis, que evidenciou efeitos negativos e significativos em todos os níveis de emissão.

A importância das energias renováveis na mitigação da poluição também foi apontada por L. K. Chu (2020), que analisou 118 países, classificados por nível de renda. Os resultados mostraram que o aumento do consumo de fontes renováveis contribui para a redução das emissões de CO₂ em todos os grupos analisados, indicando que os benefícios ambientais decorrentes da transição energética para fontes renováveis são consistentes independentemente do nível de desenvolvimento econômico. Na mesma linha, Kostakis e Arauzo-Carod (2023) utilizaram a Pegada Ecológica como *proxy* para degradação ambiental e, ao analisarem os países do G7 através dos métodos FE, FMOLS, DOLS e PMG, constataram que o consumo de energia renovável resulta em um efeito negativo sobre os níveis de degradação ambiental. Estes resultados reforçam os benefícios da produção e adoção de energias renováveis na promoção da sustentabilidade e no alcance dos Objetivos do Desenvolvimento Sustentável (Kostakis e

Arauzo-Carod, 2023).

Nesse sentido, nota-se um consenso crescente na literatura de que o consumo energético, quando baseado em fontes não renováveis, contribui significativamente para a degradação ambiental. Por outro lado, a expansão do uso de energias renováveis tem se mostrado um instrumento crucial para atenuar os efeitos ambientais negativos. Nesse sentido, a consideração do consumo de energia renovável nas análises empíricas se mostra essencial para a literatura da EKC, tendo em vista que a transição energética para fontes renováveis pode alterar a relação tradicional entre degradação ambiental e consumo energético. Diante das constatações apresentadas, formula-se a seguinte hipótese:

Hipótese 4 (H4): *O aumento do consumo de energia renovável está associado à redução da degradação ambiental.*

3.2.5. Qualidade Regulatória e Impactos ao Meio Ambiente

A eficiência das instituições, em especial no que se refere ao arcabouço regulatório de um país, desempenha papel fundamental na gestão dos impactos ambientais decorrentes do crescimento econômico e do alto consumo de energia (Ibrahim e Law, 2016; L. K. Chu, 2020; Padhan et al., 2023). Regulamentações ambientais eficazes podem mitigar os efeitos negativos da industrialização e da expansão energética ao promoverem práticas sustentáveis, limitarem as emissões poluentes e incentivarem a adoção de tecnologias limpas (Ibrahim et al., 2022). Por outro lado, ambientes institucionais frágeis, com regulações ambientais brandas, ineficientes ou mal implementadas, não se mostram capazes de atenuar a degradação ambiental, especialmente em países em desenvolvimento, onde o crescimento econômico é frequentemente priorizado em detrimento da sustentabilidade (Acheampong et al., 2019).

Dessa forma, diversos estudos têm incorporado variáveis institucionais, como a qualidade regulatória, a qualidade institucional e a eficiência governamental na abordagem da Curva Ambiental de Kuznets (L. K. Chu, 2020; Adedoyin et al., 2022; Padhan et al., 2023), com o objetivo de compreender como fatores institucionais podem modificar a relação entre crescimento econômico e degradação ambiental (Ibrahim e Law, 2016). A literatura aponta que, em países com alta qualidade regulatória, os impactos negativos do crescimento econômico sobre o meio ambiente tendem a ser menores ou revertidos mais rapidamente, uma vez que a atuação do Estado é mais eficiente no direcionamento de práticas sustentáveis (Ibrahim e Law, 2016; Oteng-Abayie et al., 2022; Afolabi, 2023).

Por exemplo, Oteng-Abayie et al. (2022) analisaram dados de 28 países da África

Subsaariana entre 2005 e 2017 e constataram que melhorias na qualidade das regulações ambientais promovem aumento da sustentabilidade ambiental em todos os modelos estimados, sendo seus efeitos mais significativos nas interações de longo prazo. Afolabi (2023) corrobora com Oteng-Abayie et al. (2022) ao examinar 41 países da mesma região e evidenciar que o aumento da qualidade regulatória promove redução da pegada ecológica. O autor ainda destaca que o fortalecimento institucional é uma estratégia eficaz, especialmente para economias intensivas em recursos naturais, no objetivo de atenuar os danos ambientais provocados pela extração desses recursos. De forma complementar, Ibrahim et al. (2022) constataam que nos países do BRICS o aumento da qualidade regulatória possibilita uma mudança estrutural que reduz significativamente as emissões de gases do efeito estufa tanto no curto quanto no longo prazo.

Em consonância, Chen et al. (2022) analisaram dados de 150 países no período de 2000 a 2016 e constataram que a melhoria da qualidade institucional, sobretudo nos componentes como efetividade governamental, controle da corrupção e qualidade da regulação, reduz significativamente a concentração de material particulado (PM_{2.5}). De forma similar, L. K. Chu (2020) analisou o papel da qualidade institucional sobre as emissões de CO₂ em 118 países e verificou que maior qualidade institucional contribui significativamente para a redução das emissões, reforçando a importância da estrutura institucional na promoção da sustentabilidade. Da mesma forma, Padhan et al. (2023) investigaram o papel das instituições regulatórias nos países membros da OCDE e constataram que maior qualidade institucional possibilita redução das emissões poluentes, caracterizando-se como um vetor fundamental para o desenvolvimento sustentável.

Além disso, mecanismos institucionais fortes são essenciais para a implementação e fiscalização de políticas públicas voltadas à energia renovável, eficiência energética e tecnologias verdes (Tenaw e Beyene, 2021). Tais políticas são cruciais para modificar o padrão do desenvolvimento, compatibilizando crescimento econômico e preservação do meio ambiente (Ibrahim et al., 2022). Nesse sentido, a literatura recente vem argumentando que o fortalecimento institucional e regulatório deve ser entendido como condição fundamental para a preservação da qualidade ambiental (Chen et al., 2022; Padhan et al., 2023).

Nota-se, portanto, que o fortalecimento institucional vem se consolidando como um fator fundamental para conciliar crescimento econômico e preservação ambiental, caracterizando-se como um importante determinante para a hipótese da Curva Ambiental de Kuznets. Assim, a consideração da qualidade regulatória nos estudos sobre degradação ambiental e crescimento econômico se mostra essencial. Essa abordagem amplia o escopo

analítico da literatura da EKC, integrando dimensões institucionais ao debate sobre meio ambiente e desenvolvimento. À luz das considerações evidenciadas, propõe-se a seguinte hipótese:

Hipótese 5 (H₅): *Uma maior qualidade institucional está associada à redução da degradação ambiental.*

3.2.6. Desenvolvimento Financeiro e Qualidade Ambiental

Recentemente, a literatura vem dedicando atenção crescente à interação entre desenvolvimento financeiro e qualidade ambiental (Ahmed et al., 2022; Basheer et al., 2023; Abid et al., 2022). Diversos pesquisadores têm debatido amplamente se o desenvolvimento financeiro contribui para a deterioração ambiental ou se, na realidade, atua como um vetor para o desenvolvimento sustentável (Basheer et al., 2023). No entanto, a literatura evidencia que a influência do desenvolvimento financeiro é ambígua, podendo tanto ampliar os danos ambientais como fomentar um progresso sustentável (Adebayo et al., 2022).

Por um lado, o avanço das instituições e mercados financeiros pode proporcionar maior acesso ao crédito e estimular o financiamento em tecnologias limpas e inovações ambientais, resultando em maior sustentabilidade (Ahmed et al., 2022). Por outro lado, o mesmo progresso financeiro pode estimular o consumo, ampliar a atividade industrial e intensificar o uso de energia, contribuindo para uma maior degradação ambiental (Odugbesan et al., 2021). Diante dessa dualidade de resultados e da reconhecida importância do setor financeiro sobre a relação entre economia e meio ambiente, a literatura tem se dedicado a investigar o papel do desenvolvimento financeiro sobre a qualidade ambiental.

Murshed e Dao (2022), por exemplo, investigaram dados das economias do Sul da Ásia entre 1972 e 2014 e observaram que o aumento do crédito ao setor privado está associado a um crescimento significativo das emissões de CO₂. Segundo os autores, um incremento de 1% no crédito privado eleva as emissões de CO₂ entre 1,67% e 1,93%, sugerindo que a ausência de diretrizes sustentáveis na alocação desses recursos potencializa os danos ambientais. Resultados similares foram encontrados por Saud et al. (2023) nos países da região MENA, onde o desenvolvimento financeiro mostrou-se positivamente relacionado tanto com as emissões de CO₂ quanto com o aumento da pegada ecológica. Os autores argumentam que o maior acesso a recursos financeiros tende a estimular o consumo de bens de alto consumo energético e acelerar o investimento em atividades industriais sem, necessariamente, considerar critérios ambientais.

Em consonância, Mahzar e Majeed (2022) examinaram dados dos países do Sul da Ásia

entre 1971 e 2019 e também identificaram uma relação positiva entre o desenvolvimento financeiro e a pegada ecológica. Segundo os autores, a remoção de restrições de crédito impulsiona a compra de equipamentos industriais e domésticos que, ao expandirem a capacidade produtiva e o consumo de energia, impõem maior pressão sobre o meio ambiente. De forma similar, Basheer et al. (2023) analisaram dados dos países do N-11 entre os anos de 1995 e 2009 e constataram que o desenvolvimento financeiro contribui significativamente para o aumento da degradação ambiental. Os autores argumentam que o desenvolvimento financeiro tende a impulsionar o crescimento econômico e atrair investimentos estrangeiros diretos (IED), o que intensifica a demanda por recursos naturais e, consequentemente, contribui para o aumento das emissões poluentes.

Em contrapartida, alguns autores têm constatado efeito oposto (Yuxiang e Chen, 2010; Ahmed et al., 2022; Abid et al., 2022). Por exemplo, Ahmed et al. (2022) identificaram que nos países do G7 o fortalecimento do sistema financeiro contribui para a redução da pegada ecológica (EFP), ao viabilizar investimentos em pesquisa, desenvolvimento e produção de tecnologias limpas. De forma similar, Yuxiang e Chen (2010) analisaram dados da China entre 1996 e 2006 e constataram uma interação negativa entre sistema financeiro e poluição. Os autores evidenciam que o desenvolvimento financeiro está associado a reduções significativas nos índices de descarga de efluentes e emissões de SO₂, indicando que, quando bem direcionado, o crédito financeiro contribui para maior qualidade ambiental.

No contexto asiático, Tuan-Hock (2020) analisou 42 países entre 2013 e 2017 e demonstrou que o desenvolvimento financeiro está positivamente relacionado ao desempenho ESG. Utilizando os métodos Pooled OLS, Fixed Effects, 2SLS e System GMM, o autor constatou que um sistema financeiro desenvolvido favorece o controle da qualidade ambiental. Abid et al. (2022) corroboram com Tuan-Hock (2020), ao analisarem as dez maiores economias do planeta entre os anos 2000 e 2019, e identificaram que o desenvolvimento financeiro contribui para a sustentabilidade ambiental. Os autores argumentam que, nessas economias, mercados financeiros bem estruturados e governos com recursos adequados favorecem o financiamento de projetos verdes e a inovação sustentável, permitindo reduzir a dependência de combustíveis fósseis, aumentar a eficiência no uso de recursos naturais e explorar fontes renováveis para manter a qualidade ambiental.

Em síntese, a literatura revela que o impacto do desenvolvimento financeiro sobre o meio ambiente depende não só do grau de maturidade do sistema financeiro, mas também da forma como o crédito e os mercados são regulados e direcionados. Em ambientes onde as instituições regulatórias são robustas e há incentivos claros a projetos verdes, o DF tende a se

converter em um vetor de sustentabilidade, viabilizando empréstimos para energias renováveis e tecnologias limpas (Ahmed et al., 2022; Abid et al., 2022). Já em cenários de regulação fraca ou em fases iniciais de desenvolvimento financeiro, o aumento do crédito frequentemente alimenta a expansão industrial e o consumo de bens de alto impacto energético, elevando emissões e pegadas ecológicas (Murshed & Dao, 2022; Saud et al., 2023). Nota-se, portanto, que a análise da interação entre desenvolvimento financeiro e meio ambiente é crucial para entender como a evolução dos mercados, instituições financeiras e acesso ao crédito pode alterar a forma e o ponto de inflexão da Curva Ambiental de Kuznets. Diante da complexidade dessa interação e da heterogeneidade dos resultados, propõe-se a seguinte hipótese:

Hipótese 6 (H₆): *O desenvolvimento financeiro exerce efeito ambíguo sobre a degradação ambiental, podendo reduzir ou aumentar os impactos ambientais.*

3.3. MÉTODO E DADOS

3.3.1. Variáveis e Estatística Descritiva

Esta pesquisa utiliza as emissões de CO₂, medidas em toneladas métricas per capita, e as emissões de gases de efeito estufa (GEE), medidas em quilotoneladas de CO₂ equivalente (kt de CO₂e), como proxies de degradação ambiental. A utilização dessas variáveis como indicadores de degradação ambiental é amplamente empregada na literatura (Pata, 2021; Can e Gozgor, 2017; Dogan et al., 2019; Simdi e Seker, 2022), o que evidencia sua relevância e aceitação como indicadores eficientes para avaliar impactos ambientais em diferentes contextos econômicos e geográficos. Além das variáveis dependentes, cinco variáveis explicativas foram empregadas no modelo. A Tabela 3 apresenta as variáveis utilizadas.

Tabela 3 - Variáveis do modelo

Indicador	Variável	Unidade de medida	Fonte
Emissões de CO ₂	CO2	Toneladas métricas per capta	World Bank
Emissões de GEE	GHG	Quilotoneladas de CO ₂ equivalente	World Bank
Crescimento econômico	GDP	PIB per capta em US\$ correntes	World Bank

Complexidade econômica	ECI	Índice de Complexidade Econômica	Atlas of Economic Complexxity
Consumo de energias renováveis	REN	Participação percentual das energias renováveis no consumo total de energia	World Bank
Qualidade regulatória	RQ	Índice de Qualidade Regulatória que se baseia na capacidade governamental de implementar políticas públicas	WGI (World Bank)
Inovação Tecnológica	TEC	Soma do número de patentes registradas por residentes e não residentes	World Bank
Desenvolvimento financeiro	FD	Índice de Desenvolvimento Financeiro que se baseia no acesso, profundidade e eficiência dos mercados e instituições financeiras	FMI

Fonte: Elaborado pelo autor

Com o intuito de investigar o impacto da complexidade econômica sobre o meio ambiente, este estudo utiliza o ECI como *proxy* para quantificar a estrutura produtiva dos países. A utilização deste indicador possibilita a captação dos aspectos qualitativos do desenvolvimento econômico, possibilitando uma análise abrangente sobre como a sofisticação da estrutura produtiva pode influenciar os níveis de degradação ambiental. Adicionalmente, o PIB foi incorporado ao modelo com o objetivo de mensurar o impacto do crescimento econômico sobre a qualidade ambiental, além de viabilizar o teste da validade da EKC por meio da inclusão de seu termo quadrático.

Para mais, esta pesquisa emprega a interação entre as variáveis tecnologia (TEC) e desenvolvimento financeiro (FD), com o intuito de capturar os efeitos de políticas públicas que combinem, de forma simultânea, incentivos ao avanço tecnológico e ao fortalecimento do setor financeiro. A variável TEC é representada pela soma do número de patentes registradas por residentes e não residentes. Esta abordagem é amplamente utilizada na literatura como proxy para inovação tecnológica (Adebayo et al., 2022). Para representar o desenvolvimento financeiro, utilizou-se o Índice de Desenvolvimento Financeiro, elaborado pelo Fundo Monetário Internacional (FMI), que mensura o grau de profundidade, acesso e eficiência dos sistemas financeiros. Esse índice contempla dados do setor financeiro tradicional (instituições bancárias e financeiras) e dos mercados financeiros (ações e títulos), fornecendo uma perspectiva abrangente sobre o papel do desenvolvimento financeiro no crescimento econômico e seus possíveis efeitos sobre o meio ambiente.

Além disso, foi considerado o consumo de energias renováveis (REN) no modelo com o intuito de capturar os efeitos da transição energética sobre a degradação ambiental. A inclusão

dessa variável permite avaliar em que medida o aumento da participação de fontes renováveis na matriz energética contribui para a redução das emissões de CO₂. A adoção de fontes limpas e sustentáveis de energia está diretamente relacionada a políticas ambientais sustentáveis e à preservação da qualidade ambiental (Pata, 2021; Balsalobre-Lorente et al., 2023).

Por fim, foi incorporada ao modelo a variável de qualidade regulatória (RQ), a qual reflete a capacidade dos governos em formular e implementar políticas públicas eficazes. A presença dessa variável permite examinar os efeitos institucionais sobre os resultados ambientais, reconhecendo que a eficácia das políticas ambientais e econômicas depende, em grande medida, da qualidade das instituições e da governança (Ibrahim e Law, 2016; Padhan et al., 2023).

Tabela 4 - Estatística descritiva

Variável	N. Obs	Média	Desvio Padrão	Mínimo	Máximo
ln_CO2	2,184	0,740	1,626	-3,559	3,982
ln_GHG	2,184	4,530	1,528	1,222	9,656
ln_GDP	2,184	8,669	1,523	5,533	11,453
ECI	2,184	0,521	0,178	0,000	1,000
REN	2,184	0,340	0,302	0,000	0,983
RQ	2,184	0,531	0,212	0,000	1,000
TEC	2,184	0,013	0,067	0,000	1,000
FD	2,184	0,355	0,269	0,000	1,000

Fonte: Elaborado pelo autor

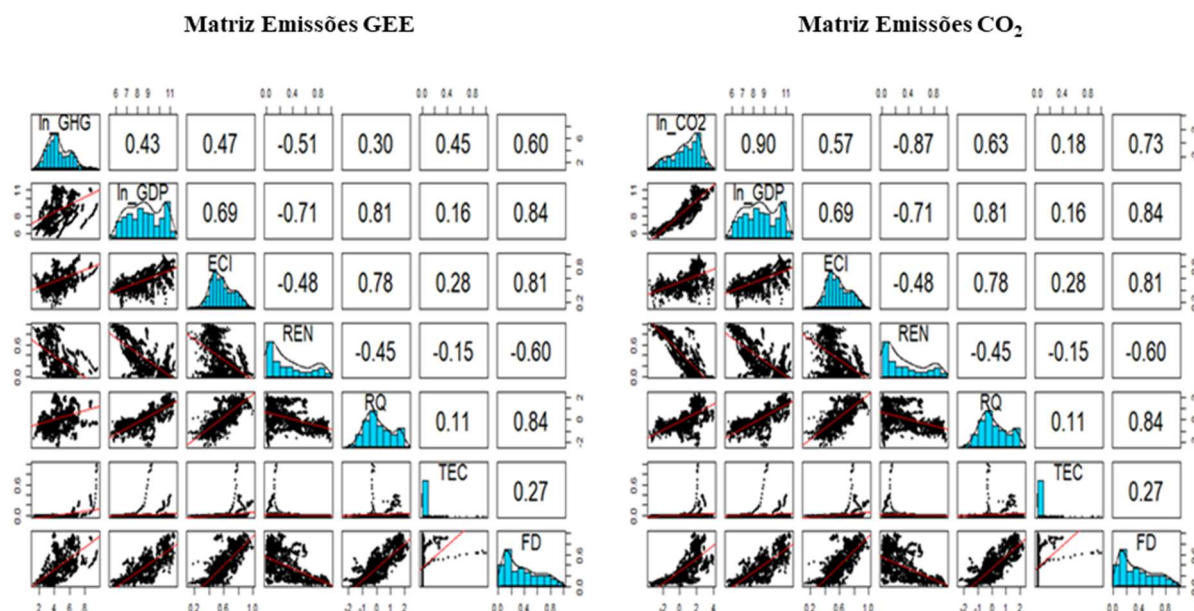
A Tabela 4 apresenta as estatísticas descritivas das variáveis utilizadas no modelo econométrico. Conforme a recomendação de Adebayo et al. (2022), aplicou-se o logaritmo natural às variáveis GDP e CO₂ com o objetivo de reduzir a assimetria das distribuições e aproximá-las de uma distribuição normal.

As variáveis ECI, RQ, FD e TEC foram normalizadas para o intervalo de 0 a 1, com o intuito de facilitar a comparação entre escalas distintas. A variável ECI apresentou média de 0,521, sendo que o valor 0 representa o país com menor complexidade e 1 aquele com maior complexidade. A variável RQ apresentou média de 0,531, sendo que 0 indica o país com menor qualidade regulatória e 1 aquele com melhor qualidade regulatória.

De forma similar, FD apresentou média de 0,355, sendo que o valor 0 representa o menor nível de desenvolvimento financeiro observado e 1 o maior. A variável TEC apresentou média de 0,013 após normalização, sendo que 0 representa o país com menor número de patentes registradas e 1 o país com o maior número. Por fim, a variável REN, que está expressa

em termos percentuais, com valores variando entre 0 (mínimo) e 0,983 (máximo) e média de 0,340. O número total de observações para todas as variáveis foi de 2.184. A Figura 22 exibe a matriz de correlação entre as variáveis.

Figura 22 - Matrizes de correlação



Fonte: Elaborado pelo autor

As matrizes de correlação evidenciam que o aumento do PIB está positivamente associado tanto às emissões de CO₂ quanto às emissões totais de gases de efeito estufa, o que sustenta a parte ascendente da Curva Ambiental de Kuznets. Observa-se também correlação negativa entre a participação de energias renováveis (REN) e ambas as medidas de emissões, indicando que uma maior utilização de fontes renováveis está associada à redução da degradação ambiental. Além disso, FD, RQ e ECI apresentam correlação positiva com CO₂ e GEE, sugerindo que maiores níveis de desenvolvimento financeiro, qualidade regulatória e complexidade econômica tendem a estar associados a níveis mais elevados de emissões. Por sua vez, a variável TEC apresenta correlação relativamente baixa com as demais variáveis do modelo.

Considerando a natureza dos dados, esta pesquisa adotou a estimação por painel. Esse método permite a observação de n unidades ao longo de dois ou mais períodos de tempo. Tal abordagem é especialmente vantajosa para capturar as variações ao longo do tempo, possibilitando uma investigação mais consistente e aprofundada das relações entre as variáveis em análise. Assim, esse estudo emprega um modelo econométrico para testar a hipótese EKC, bem como investigar o efeito da complexidade econômica e de medidas públicas combinadas sobre as emissões poluentes em 104 países do mundo, no período de 2000 a 2021 (a lista

completa dos países da amostra está apresentada no Apêndice A). Além disso, as variáveis de controle PIB, qualidade regulatória (RQ) e consumo de energias renováveis (REN) também foram incorporadas no modelo, seguindo a literatura recente.

Antes de prosseguir com a estimação do modelo, alguns testes estatísticos são realizados com o objetivo de verificar a adequação dos dados. Esses testes visam garantir que as estimativas sejam consistentes e confiáveis, por meio da identificação de possíveis problemas como variância não constante, dependência entre unidades e estacionariedade das séries. A condução dessas verificações é essencial para a robustez dos resultados.

3.3.2. Teste de Hausman

Os modelos de estimação em painel são amplamente utilizados na literatura (Adedoyin et al., 2021; Liu et al., 2019; Bucher et al., 2023; Ul-Haq et al., 2023). Em geral, esses modelos são estimados por meio de duas abordagens principais: efeitos fixos (FE) e efeitos aleatórios (RE). O modelo de efeitos fixos controla os impactos de variáveis não observáveis que são específicas a cada unidade e que permanecem constantes ao longo do tempo (Judge et al., 1991). Por outro lado, o modelo de efeitos aleatórios assume que essas características específicas são aleatórias e não correlacionadas com as variáveis explicativas incluídas no modelo.

Em outros termos, o modelo de efeitos fixos considera os efeitos individuais (α_i) e os efeitos temporais (γ_t) como parâmetros a serem estimados diretamente na regressão. Já o modelo de efeitos aleatórios trata esses mesmos termos (α_i e γ_t) como componentes do erro aleatório (Stern, 2004). Caso os efeitos individuais e os efeitos temporais estejam correlacionados com as variáveis explicativas do modelo, então o modelo de efeitos aleatórios não poderá ser estimado de forma consistente (Hsiao, 1986).

O teste de Hausman (1978) se apresenta como ferramenta eficaz para a verificação de qual modelo é o mais apropriado. O teste se fundamenta na comparação entre os coeficientes estimados pelos modelos de efeitos fixos e efeitos aleatórios. O modelo geral é denotado por:

$$H = (\beta_{FE} - \beta_{RE})^T (var(\beta_{FE}) - var(\beta_{RE}))^{-1} (\beta_{FE} - \beta_{RE}) \quad (1)$$

Onde β_{FE} e β_{RE} representam, respectivamente, os coeficientes estimados dos modelos de efeitos fixos e efeitos aleatórios. A hipótese nula subjacente ao teste de Hausman é de que os fatores não observados não estão correlacionados com as variáveis explicativas do modelo (Polat e Çil, 2024). Isto é, quando a diferença entre os coeficientes de FE e RE é estatisticamente significativa, isso indica que o modelo de RE apresenta estimativas inconsistentes, indicando a

existência de correlação entre as variáveis explicativas e os componentes do erro (Stern, 2004). Nesse caso, adota-se o modelo de efeitos fixos.

3.3.3. Teste de Dependência de Corte Transversal (CSD)

A dependência *cross-sectional* também é um problema frequente em modelos de dados em painel, principalmente devido às interconexões existentes entre os países tanto em nível regional quanto global (Zafar et al., 2018). Quando essa dependência não é devidamente controlada, os estimadores podem se tornar inconsistentes e viesados (Phillips e Sul, 2003). Diante disso, torna-se fundamental examinar a presença de dependência *cross-sectional* nos dados deste trabalho. Para isso, o presente estudo utilizou o teste proposto por Pesaran (2004) que verifica a existência de interdependências entre as unidades do painel. O teste é definido pela seguinte equação:

$$CD = \sqrt{\frac{2T}{N(N-1)}} \left(\sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N \rho_{ij} \right) \quad (2)$$

Onde N representa o tamanho da amostra, T o período e ρ_{ij} evidencia a correlação estimada de erros entre i e j . Em síntese, a hipótese nula do teste de Pesaran (2004) estabelece que as seções cruzadas dos dados são independentes, enquanto a hipótese alternativa sugere que as seções cruzadas são dependentes entre si.

3.3.4. Teste de Raiz Unitária

Com o objetivo de testar as propriedades de séries temporais das variáveis desse estudo, foi aplicado o teste de raiz unitária de Dickey-Fuller Aumentado (ADF), que é amplamente utilizado na literatura (Khezri et al., 2022; Khan et al., 2022; Numan et al., 2022). O teste ADF verifica a presença de raiz unitária na série temporal determinando se a série é estacionária ou não estacionária. Séries temporais que apresentam dados não estacionários podem resultar em problemas de cointegração e estimações espúrias (Liu e Zhou, 2025). O teste ADF é dado pela seguinte equação:

$$\Delta y_t = \alpha_0 + \rho y_{t-1} + \sum_{i=1}^p \beta_i \Delta y_{t-1} + \varepsilon_t \quad (3)$$

Onde y_t representa o vetor de série temporal das variáveis, p denota o número ótimo de

defasagens incorporadas e ε_t corresponde ao termo de erro aleatório. A hipótese nula do teste ADF indica que os dados apresentam raiz unitária, ou seja, são não estacionários. Por outro lado, a hipótese alternativa sugere que a série é estacionária, não apresentando raiz unitária.

3.3.5. Teste de Breusch-Pagan

A variância dos resíduos de uma regressão apresenta papel crucial na precisão dos estimadores (Breusch e Pagan, 1979). Quando esta variação não é constante, há evidências de que o modelo adotado apresenta o problema de heterocedasticidade. Breusch e Pagan (1979) explicam que a presença de heterocedasticidade pode resultar em perda de eficiência dos estimadores e vieses nas estimativas dos erros padrão, o que compromete a validade das inferências estatísticas. Para verificar a presença de heterocedasticidade, este estudo emprega o teste de Breusch-Pagan, que consiste em avaliar se a variância dos resíduos da regressão depende linearmente dos regressores.

Em síntese, o teste de Breusch-Pagan (1979) se baseia em um vetor de resíduos ($\hat{u}$) estimados por um modelo de MQO e a variância destes resíduos é estimada pela média dos quadrados dos resíduos, conforme a seguinte fórmula:

$$\sigma^2 = \hat{u}'\hat{u}/n \quad (4)$$

Com isso, o teste utiliza a estatística LM que se baseia na regressão dos quadrados dos resíduos em relação a um conjunto de variáveis (Z):

$$\hat{u}_i^2 = \alpha_0 + \alpha_1 Z_{1i} + \dots + \alpha_p Z_{pi} + \varepsilon_i \quad (4.1)$$

Assim, a estatística LM é definida por:

$$LM = \frac{1}{2} w'Z(Z'Z)^{-1}Z'w/\sigma^4 \quad (4.2)$$

Em que w_i representa a diferença entre o quadrado do erro estimado e a variância média dos resíduos, isto é, $w_i = \hat{u}_i^2 - \sigma^2$. Sob hipótese nula de homocedasticidade, a estatística do teste tende a seguir uma distribuição qui-quadrado com p graus de liberdade (Koenker, 1981). Se o p -valor for muito baixo, rejeita-se a hipótese nula, sugerindo a presença de heterocedasticidade no modelo.

3.3.6. Teste de Wooldridge

A autocorrelação em séries temporais pode afetar a consistência das estimativas e a validade das inferências estatísticas (Born e Breitung, 2014). Para verificar a existência de autocorrelação no modelo, esta pesquisa utilizou o teste proposto por Wooldridge (2002), que é amplamente utilizado na literatura. Wooldridge (2002) sugere realizar uma regressão de MQO e, posteriormente, uma regressão dos resíduos defasados. O teste se baseia na seguinte equação:

$$\hat{u}_{it} = \rho \hat{u}_{i,t-1} + \varepsilon_{it} \quad (5)$$

Em que $\hat{u}_{it}$ representa os resíduos estimados da regressão e $\hat{u}_{i,t-1}$ se refere aos resíduos defasados de primeira ordem. Sob hipótese nula, espera-se que os resíduos sejam não correlacionados ao longo do tempo. A hipótese nula é rejeitada quando o teste apresenta *p-valores* muito baixos, indicando a presença de autocorrelação entre os resíduos.

3.3.7. Teste de Fator de Inflação da Variância (VIF)

A presença de multicolinearidade entre as variáveis explicativas pode comprometer a precisão das estimativas econométricas, inflacionando as variâncias dos estimadores e dificultando a interpretação dos coeficientes individuais (Gujarati e Porter, 2009). Com o objetivo de verificar a existência de multicolinearidade nos modelos estimados, esta pesquisa emprega o Fator de Inflação da Variância (*Variance Inflation Factor* – VIF), amplamente utilizado na literatura (Kutner et al., 2005; O’Brien, 2007).

Em síntese, o teste VIF consiste em estimar, para cada variável X_j , uma regressão auxiliar em que cada variável é explicada pelas demais variáveis independentes do modelo. O cálculo do VIF se baseia na seguinte equação:

$$VIF_j = \frac{1}{1 - R_j^2} \quad (6)$$

Em que VIF_j representa o fator de inflação da variância referente a variável j e R_j^2 o coeficiente de determinação da regressão auxiliar. A não existência de uma relação exata entre as variáveis ocorre quando $R_j^2 = 0$, assim, VIF será igual 1. Conforme aproxima-se de uma relação exata ($R_j^2 = 1$), VIF tenderá ao infinito. De modo geral, a literatura sugere que valores de VIF superiores a 10 indicam multicolinearidade severa, enquanto valores acima de 5 já podem

sinalizar problemas moderados, a depender do contexto empírico e do tamanho da amostra (Kutner et al., 2005; Gujarati e Porter, 2009). Assim, a análise do VIF permite avaliar a robustez das estimativas e a confiabilidade das inferências estatísticas realizadas a partir dos modelos econométricos estimados nesta pesquisa.

3.3.8. Clusterização por K-Means

A heterogeneidade estrutural entre países constitui um elemento crucial na análise da relação entre crescimento econômico e degradação ambiental (Wang et al., 2024). Em amostras compostas por economias com distintos níveis de renda, estrutura produtiva e arcabouço institucional, os resultados de estimação de um modelo geral tendem a generalizar resultados de estimação. Nesse sentido, esta pesquisa aplica uma técnica de clusterização a partir do método K-means sobre a amostra geral, segmentando-a em três clusters relativamente homogêneos, com o objetivo de capturar possíveis heterogeneidades estruturais entre diferentes grupos de países.

O método K-means é uma técnica de aprendizagem não supervisionada amplamente utilizada para a segmentação de observações com base na minimização da variância intra-grupo (MacQueen, 1967). O objetivo do K-means consiste em particionar um conjunto de n observações em K clusters mutuamente exclusivos, de modo que as observações dentro de cada grupo sejam o mais semelhantes possível entre si e, simultaneamente, o mais distintas possível das observações pertencentes a outros grupos. Em síntese, o método busca minimizar a soma das distâncias quadráticas entre cada observação x_i e o centróide μ_k do cluster ao qual ela pertence (Chong, 2021), conforme a seguinte equação:

$$\min \sum_{k=1}^K \sum_{i \in C_k} \|x_i - \mu_k\|^2 \quad (7)$$

Em que C_k representa o conjunto de observações pertencentes ao cluster k , e μ_k corresponde ao vetor médio das variáveis que caracterizam esse grupo.

Inicialmente, o algoritmo K-means define aleatoriamente K centróides a partir do conjunto de dados e, em seguida, calcula a distância de cada observação em relação a todos os centróides, sendo cada unidade alocada ao cluster cujo centróide apresenta a menor distância (Ikotun et al., 2023). A cada nova atribuição, o centróide de cada grupo é recalculado com base nas observações que o compõem. Esse procedimento é realizado de forma iterativa, até que a

composição dos clusters se torne estável e não ocorram alterações significativas na alocação das observações (Ikotun et al., 2023).

Considerando que o método K-means é sensível à escala dos indicadores, todas as variáveis utilizadas na clusterização foram previamente padronizadas. Essa etapa é crucial para evitar que variáveis expressas em escalas maiores exerçam influência desproporcional sobre a formação dos grupos. Nesse estudo, a clusterização foi realizada com base nas variáveis emissões de CO₂, PIB, complexidade econômica, qualidade regulatória e desenvolvimento financeiro, permitindo a identificação de grupo de países com características estruturais semelhantes. Dessa forma, a amostra geral de 104 países foi segmentada em três clusters distintos, a saber: i) economias avançadas e complexas; ii) economias intermediárias e iii) economias de baixa complexidade e capacidade estrutural. A composição detalhada de cada grupo está apresentada no Apêndice B.

3.3.9. Modelos Econométricos

Esta pesquisa adota seis modelos gerais para investigar o efeito das variáveis sobre a degradação ambiental em toda amostra de países. Os três primeiros modelos adotam as emissões de CO₂ como *proxy* para degradação ambiental e são definidos pelas seguintes equações:

Modelo 1:

$$\ln CO2_{it} = \alpha_{it} + \beta_0 + \beta_1 \ln GDP_{it} + \beta_2 \ln GDP_{it}^2 + \beta_3 \ln ECI_{it} + \beta_4 REN_{it} + \beta_5 RQ_{it} + \beta_5 FD_{it} + \beta_6 TEC_{it} + \varepsilon_{it} \quad (8)$$

Modelo 2:

$$\ln CO2_{it} = \alpha_{it} + \beta_0 + \beta_1 \ln GDP_{it} + \beta_2 \ln GDP_{it}^2 + \beta_3 \ln ECI_{it} + \beta_4 REN_{it} + \beta_5 RQ_{it} + \beta_5 FD_{it} + \beta_6 TEC_{it} + \beta_6 FD \times TEC_{it} + \varepsilon_{it} \quad (9)$$

Modelo 3:

$$\ln CO2_{it} = \alpha_{it} + \beta_0 + \beta_1 \ln GDP_{it} + \beta_2 \ln GDP_{it}^2 + \beta_2 \ln GDP_{it}^3 + \beta_3 \ln ECI_{it} + \beta_4 REN_{it} + \beta_5 RQ_{it} + \beta_5 FD_{it} + \beta_6 TEC_{it} + \beta_6 FD \times TEC_{it} + \varepsilon_{it} \quad (10)$$

Em que i representa os países ($i = 1, 2, \dots, N$), t o ano ($t = 1, 2, \dots, T$), α_i o intercepto e β_k os coeficientes do modelo. $\ln_CO2$ é a variável de interesse do modelo e representa a *proxy* para degradação ambiental. GDP representa o crescimento econômico e é medido em US\$ correntes

per capita. O termo quadrático de GDP foi empregado no modelo com o intuito de testar a validade da hipótese EKC. ECI se refere ao Índice de Complexidade Econômica, REN representa a proporção do consumo de energias decorrentes de fontes renováveis, RQ o Índice de Qualidade Regulatória, FD o Índice de Desenvolvimento Financeiro, TEC o nível de inovação tecnológica e, por fim, o termo de erro do modelo que é representado por ε_{it} . Note que, o Modelo 2 (7) apresenta o termo $FD \times TEC$ que representa a variável de interação que quantifica o impacto de medidas públicas combinadas de desenvolvimento financeiro e tecnologia. Além disso, o Modelo 3 inclui o termo cúbico de GDP com a finalidade de testar a hipótese de relação em formato de “N” entre crescimento econômico e degradação do meio ambiente.

De forma complementar, a pesquisa considera mais três modelos gerais que seguem a mesma especificação econométrica dos Modelos 1, 2 e 3, diferindo apenas na variável dependente. Nesses modelos adicionais, as emissões de gases de efeito estufa (GEE) são utilizadas como proxy alternativa para a degradação ambiental, permitindo verificar a robustez dos resultados e ampliar a análise para além das emissões de CO₂. Assim, os Modelos 4, 5 e 6 replicam, respectivamente, as estruturas básicas dos modelos 1, 2 e 3, com termo de interação entre desenvolvimento financeiro e tecnologia e com a inclusão do termo cúbico do PIB, mantendo as mesmas variáveis explicativas. Os modelos 4, 5 e 6 são definidos pelas equações:

Modelo 4:

$$\ln GHG_{it} = \alpha_{it} + \beta_0 + \beta_1 \ln GDP_{it} + \beta_2 \ln GDP_{it}^2 + \beta_3 \ln ECI_{it} + \beta_4 REN_{it} + \beta_5 RQ_{it} + \beta_5 FD_{it} + \beta_6 TEC_{it} + \varepsilon_{it} \quad (11)$$

Modelo 5:

$$\ln GHG_{it} = \alpha_{it} + \beta_0 + \beta_1 \ln GDP_{it} + \beta_2 \ln GDP_{it}^2 + \beta_3 \ln ECI_{it} + \beta_4 REN_{it} + \beta_5 RQ_{it} + \beta_5 FD_{it} + \beta_6 TEC_{it} + \beta_6 FD \times TEC_{it} + \varepsilon_{it} \quad (12)$$

Modelo 6:

$$\ln GHG_{it} = \alpha_{it} + \beta_0 + \beta_1 \ln GDP_{it} + \beta_2 \ln GDP_{it}^2 + \beta_2 \ln GDP_{it}^3 + \beta_3 \ln ECI_{it} + \beta_4 REN_{it} + \beta_5 RQ_{it} + \beta_5 FD_{it} + \beta_6 TEC_{it} + \beta_6 FD \times TEC_{it} + \varepsilon_{it} \quad (13)$$

Adicionalmente, além dos modelos gerais estimados para a amostra total de países, esta pesquisa adota seis modelos desagregados com o objetivo de capturar possíveis heterogeneidades estruturais entre diferentes grupos de economias. A amostra geral é

segmentada em três clusters: i) economias avançadas e complexas; ii) economias intermediárias e iii) economias de baixa complexidade e capacidade estrutural. Para cada cluster, são estimados dois modelos econométricos: um modelo base, sem o termo de interação, e um modelo ampliado, que incorpora o termo de interação entre desenvolvimento financeiro e tecnologia (FDxTEC). Os modelos são definidos pelas seguintes equações:

Modelo 7 (base):

$$\ln CO2_{it} = \alpha_{it} + \beta_0 + \beta_1 \ln GDP_{it} + \beta_2 \ln GDP_{it}^2 + \beta_3 \ln ECI_{it} + \beta_4 REN_{it} + \beta_5 RQ_{it} + \beta_6 FD_{it} + \beta_7 TEC_{it} + \varepsilon_{it} \quad (14)$$

Modelo 8 (com interação):

$$\ln CO2_{it} = \alpha_{it} + \beta_0 + \beta_1 \ln GDP_{it} + \beta_2 \ln GDP_{it}^2 + \beta_3 \ln ECI_{it} + \beta_4 REN_{it} + \beta_5 RQ_{it} + \beta_6 FD_{it} + \beta_7 TEC_{it} + \beta_8 FDxTEC_{it} + \varepsilon_{it} \quad (15)$$

Essa estratégia metodológica permite analisar como os determinantes da degradação ambiental se comportam em distintos estágios de desenvolvimento e complexidade produtiva, bem como avaliar se o efeito combinado de medidas financeiras e tecnológicas difere entre os grupos de países.

3.4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.4.1. Resultados dos Testes

A análise deste estudo se inicia pela verificação dos estimadores em painel através do teste de Hausman (1978). A Tabela 5 apresenta o resultado do teste.

Tabela 5 - Teste de Hausman

Estatística	Valor
Qui-quadrado (chisq)	69.46965
Graus de Liberdade (df)	8
Valor-p (p-value)	6.26e-12

Fonte: Elaborado pelo autor

Note que o p-valor é estatisticamente significativo ao nível de significância de 1%, o que implica a rejeição da hipótese nula. Desta forma, o resultado do teste de Hausman sugere que o modelo de efeitos fixos é o mais adequado para esta análise.

O passo seguinte se caracteriza pela verificação da presença de dependência *cross-sectional*, através do teste de Pesaran (2004). A Tabela 6 exibe o resultado.

Tabela 6 - Teste de Pesaran (CSD)

Estatística	Valor
Modelo: $\ln_CO2 \sim \ln_GDP + \ln_GDP2 + ECI + REN + RQ + TEC + FD + FD_TEC$	
Z:	15.773
Valor-p (p-value)	2.2e-16

Fonte: Elaborado pelo autor

Observa-se que o p-valor é estatisticamente significativo, revelando que a hipótese nula de não dependência *cross-sectional* é rejeitada. Em outros termos, este resultado sugere que há fortes evidências de dependência *cross-sectional* nos dados do modelo, o que pode enviesar os estimadores.

Para checar a estacionariedade das variáveis, foi empregado o teste de Dickey-Fuller Aumentado. A Tabela 7 apresenta o resultado do teste.

Tabela 7 - Teste de Dickey Fuller Aumentado (ADF)

Teste	$\ln_CO2$	$\ln_GDP$	ECI	REN	RQ	FD	TEC
Estatística ADF	-12.723***	-11.559***	-13.682***	-12.844***	-10.409***	-13.712***	-9.522***
Valor-p	9.745e-24	3.299e-21	1.394e-25	5.519e-24	1.822e-18	1.228e-25	3.039e-16

Fonte: Elaborado pelo autor

De acordo com o resultado do teste ADF, todas as variáveis apresentam p-valor estatisticamente significativo, indicando que as variáveis não apresentam raízes unitárias. Isto significa que os dados da série temporal deste modelo são estacionários e não apresentam problemas de cointegração.

Em seguida, foi aplicado o teste de Breusch-Pagan (1979) para verificar se o modelo apresenta o problema de heterocedasticidade. O resultado do teste é exposto na Tabela 8.

Tabela 8 - Teste de Breusch-Pagan

Estatística	Valor
Breusch-Pagan	128.99
Graus de Liberdade (df)	8
Valor-p (p-value)	2.2e-16

Fonte: Elaborado pelo autor

Note que o p-valor apresenta significância estatística ao nível de 1%, o que implica dizer que a hipótese nula de homocedasticidade é rejeitada. Este resultado, portanto, sugere que o modelo apresenta evidências de heterocedasticidade, o que compromete a validade dos estimadores.

Adicionalmente, foi aplicado o teste de Wooldridge (2002) com o objetivo de verificar se os resíduos do modelo são correlacionados ao longo do tempo.

Tabela 9 - Teste de Wooldridge

Estatística	Valor
F:	2409.6
df1:	1
df2:	2078
Valor-p (p-value)	2.2e-16

Fonte: Elaborado pelo autor

O resultado do teste, apresentado na Tabela 9, evidencia um p-valor baixo (0,000), indicando que há fortes evidências para a presença de autocorrelação nos resíduos do modelo aplicado.

Por fim, aplicou-se o teste VIF com o objetivo de verificar a presença de multicolinearidade entre as variáveis explicativas do modelo. A tabela 10 apresenta o resultado do teste.

Tabela 10 - Teste VIF

Variável	VIF
ln_GDP:	5.674978
ECI:	3.357853
REN:	2.336362
RQ:	5.256734
TEC:	1.183987
FD:	5.866833
Média VIF:	3,946124

Fonte: Elaborado pelo autor

O resultado do teste VIF evidencia que, no geral, as variáveis explicativas do modelo não apresentam multicolinearidade severa. As variáveis ln_GDP, RQ e FD registram valores mais elevados de VIF, situando-se acima do limiar de 5, mas ainda abaixo do valor crítico de 10 comumente adotado na literatura como indicativo de multicolinearidade severa. As demais variáveis apresentam valores baixos de VIF, sugerindo fraca correlação linear com os demais regressores. Em outros termos, o VIF indica que o modelo econométrico proposto não possui evidências de multicolinearidade.

3.4.2. Resultados Econométricos

Para superar os problemas identificados nos testes acima, foi empregado o método de erros-padrão de Driscoll e Kraay (1998), que é um modelo robusto e trata de problemas econométricos (Polat e Çil, 2024). Assim, a estimação deste estudo utilizou o modelo de Efeitos Fixos de Driscoll-Kraay (FE-DK) que corrige os problemas de dependência cross-sectional, heterocedasticidade e autocorrelação, fornecendo estimativas consistentes e robustas de erros-padrão (Driscoll e Kraay, 1998).

Tabela 11 - Resultados de regressão dos modelos para emissões de CO₂

<i>Dependent variable: ln_CO2</i>			
	Modelo 1	Modelo 2	Modelo 3
ln_GDP	1.964*** (0.194)	1.949*** (0.192)	2.219*** (0.746)
ln_GDP2	-0.091*** (0.012)	-0.090*** (0.012)	-0.124 (0.086)
ln_GDP3			0.001 (0.003)
ECI	-0.120 (0.075)	-0.128* (0.075)	-0.124* (0.072)
REN	-2.165*** (0.216)	-2.158*** (0.217)	-2.165*** (0.209)
RQ	-0.055*** (0.018)	-0.054*** (0.018)	-0.054*** (0.018)
FD	0.248*** (0.068)	0.258*** (0.070)	0.267*** (0.079)
TEC	0.010 (0.053)	1.236*** (0.230)	1.305*** (0.238)
FD_TEC		-1.827*** (0.285)	-1.921*** (0.310)

Note:

* p<0.1; ** p<0.05; *** p<0.01

Fonte: Elaborado pelos autores

A Tabela 11 apresenta os resultados dos Modelos 1, 2 e 3, nos quais as emissões de CO₂ são consideradas variável dependente. As estimativas indicam que os coeficientes associados a ln_GDP são positivos e estatisticamente significativos, enquanto o termo quadrático do PIB apresenta sinal negativo e é estatisticamente significativo apenas nos Modelos 1 e 2. Para os modelos que utilizam as emissões de gases de efeito estufa (GEE) como variável dependente,

os coeficientes de $\ln_GDP$ também se mostram positivos e estatisticamente significativos, ao passo que o termo quadrático apresenta coeficiente negativo e estatisticamente significativo em todos os modelos estimados. Esses resultados comprovam a Hipótese H_1 e confirmam a validade da Curva Ambiental de Kuznets no formato de “U” invertido para a amostra de países analisada (Can e Gozgor, 2017; Ali et al., 2022; Adedoyin et al., 2021; Simdi e Seker, 2022). Em termos quantitativos, observa-se que um aumento de 1% no $\ln_GDP$ está associado a um incremento entre 1,95% e 2,22% nas emissões de CO_2 e entre 1,78%, 1,77% e 2,48% nas emissões de GEE. Em contrapartida, um aumento de 1% no termo quadrático do PIB está associado a uma redução de aproximadamente 0,09% nas emissões de CO_2 e entre 0,07% e 0,165% nas emissões de GEE.

Tabela 12 – Resultados de regressão dos modelos para emissões de GEE

<i>Dependent variable: $\ln_GHG$</i>			
	Modelo 4	Modelo 5	Modelo 6
$\ln_GDP$	1.780*** (0.085)	1.769*** (0.084)	2.477*** (0.686)
$\ln_GDP^2$	-0.076*** (0.006)	-0.076*** (0.006)	-0.165* (0.086)
$\ln_GDP^3$			0.004 (0.003)
ECI	0.125 (0.092)	0.119 (0.094)	0.129 (0.089)
REN	-1.421** (0.120)	-1.416*** (0.120)	-1.435*** (0.112)
RQ	-0.022* (0.012)	-0.021* (0.011)	-0.022* (0.012)
FD	0.413*** (0.143)	0.421*** (0.145)	0.446*** (0.165)
TEC	-0.077** (0.032)	0.823*** (0.189)	1.004*** (0.309)
FD_TEC		-1.342*** (0.252)	-1.589*** (0.432)

Note:

* $p < 0.1$; ** $p < 0.05$; *** $p < 0.01$

Fonte: Elaborado pelos autores

Este resultado indica que nos estágios iniciais do desenvolvimento econômico, as

emissões poluentes aumentam à medida que a expansão da atividade produtiva demanda maior uso de energia e recursos naturais, geralmente provenientes de fontes não renováveis, como carvão e petróleo (Grossman & Krueger, 1995). Entretanto, após atingir um determinado ponto, essa tendência se reverte, e as emissões passam a decrescer, indicando que o avanço econômico tende a promover maior qualidade ambiental (Dinda, 2004; Can e Gozgor, 2017).

Essa transição está associada a mudanças estruturais nas economias, que podem incluir: (i) substituição gradual de fontes fósseis por energias renováveis, como observado nos Estados Unidos por Pata (2021), na Europa por Balsalobre-Lorente et al. (2023) e na China por Adebayo et al. (2022); (ii) fortalecimento de políticas regulatórias ambientais, como o imposto sobre o carbono, amplamente adotado nos países da União Europeia (Dogan et al., 2022); e (iii) mudanças na estrutura produtiva, com a substituição de atividades intensivas em recursos naturais por setores intensivos em conhecimento e tecnologias mais limpas (Adedoyin, 2021; Ahmed et al., 2021; Ali et al., 2022). Assim, o resultado empírico encontrado está em consonância com os estudos de Mania (2019), Adedoyin et al. (2021) e Liu et al. (2019), que também identificaram a validade da EKC em formato de “U” invertido em diferentes contextos e destacaram a importância do estágio de desenvolvimento econômico na determinação do impacto ambiental.

Os Modelos 3 e 6 aprofundam a análise da relação entre crescimento econômico e emissões poluentes ao incorporar o termo cúbico do PIB, permitindo testar a hipótese da EKC em formato de “N”. Os resultados de ambos os modelos indicam que o coeficiente associado a $\ln_GDP$ apresenta sinal positivo, enquanto $\ln_GDP^2$ possui sinal negativo e $\ln_GDP^3$ sinal positivo. Contudo, no Modelo 3, tanto o termo quadrático quanto o termo cúbico não se mostram estatisticamente significativos. No Modelo 6, por sua vez, observa-se significância estatística apenas para $\ln_GDP$ e seu termo quadrático, permanecendo o termo cúbico estatisticamente não significativo. Dessa forma, não há evidências empíricas robustas que sustentem a existência de uma relação em formato de “N” entre renda e emissões poluentes para a amostra analisada. Esse resultado está em consonância com os achados de Gyamfi et al. (2021) e Caporin et al. (2024), mas diverge das evidências reportadas por Ozokcu e Ozdemir (2017) e Hossain et al. (2023).

No que se refere à complexidade econômica, os resultados dos Modelos 4, 5 e 6 não indicam significância estatística para ECI. Em contrapartida, as estimativas dos Modelos 1, 2 e 3 mostram que o ECI apresenta coeficiente negativo, sendo estatisticamente significativo nos Modelos 2 e 3. Esse resultado confirma a Hipótese H_2 , sugerindo que economias mais complexas tendem a apresentar menores níveis de emissões de CO_2 (Can e Gozgor, 2017; Ahmed et al., 2021; Leitão et al., 2021). Em termos quantitativos, um aumento de 1% no ECI

está associado a uma redução aproximada entre 0,12% e 0,13% nas emissões. Tendo em vista que ECI reflete o nível de conhecimento, capacidade tecnológica e sofisticação da estrutura produtiva de um país (Hausmann et al., 2013), um aumento deste índice indica maior diversificação produtiva, incorporação de processos mais eficientes e adoção de tecnologias menos poluentes (Hidalgo e Hausmann, 2009; Ni et al., 2025). Nota-se, portanto, que a elevação da complexidade econômica impulsiona a transição da matriz produtiva de setores primários e industriais intensivos em recursos naturais para setores baseados em conhecimento e tecnologia, que tendem a gerar menos emissões poluentes por unidade de produto (Mealy e Teytelboym, 2022).

Na prática, essa transição tende a promover a substituição gradual de indústrias poluentes por setores como tecnologia da informação, biotecnologia e produção de equipamentos de energia renovável, como observado na Coreia do Sul e Singapura nas últimas décadas (Lee e Choi, 2024; Hosono, 2022). Economias mais complexas também apresentam maiores incentivos para investir em Pesquisa e Desenvolvimento (P&D), favorecendo a implementação e difusão de tecnologias verdes que reduzem significativamente as emissões, como sistemas digitais de automação industrial (Jamwal et al., 2021), componentes para geração de energia renovável (Sharma et al., 2025) e processos de controle e redução de resíduos (Li et al., 2023). Estes achados são consistentes com os resultados de Ahmed et al. (2021), Adedoyin et al. (2017) e Leitão et al. (2021), que identificaram efeitos mitigadores da complexidade econômica sobre a degradação ambiental. Entretanto, divergem das conclusões de Yilanci e Pata (2020) e Kherzi et al. (2022), que apontaram relação neutra ou positiva, sugerindo que o efeito do ECI pode variar conforme o estágio de desenvolvimento e a composição setorial de cada economia.

Os resultados validam também a hipótese H₄, evidenciando que o consumo de energias renováveis (REN) apresenta coeficiente negativo e estatisticamente significativo em todos os modelos propostos (Pata, 2021; Balsalobre-Lorente et al., 2022; Dogan et al., 2022). Em termos quantitativos, um aumento percentual unitário em REN está associado a uma redução de 2,16% nas emissões de CO₂ e de aproximadamente 1,43% nas emissões de GEE. Esses achados estão em consonância com estudos que evidenciam a eficácia das fontes renováveis na mitigação da degradação ambiental. Por exemplo, Balsalobre-Lorente et al. (2023) destacam que a transição para matrizes energéticas renováveis contribui para a melhoria da qualidade ambiental e redução das emissões de poluentes nos países do G7. Além disso, Pata (2021) observa que o aumento do consumo de energias renováveis está associado a uma diminuição das emissões de CO₂ nos Estados Unidos, reforçando a importância dessa transição para a sustentabilidade

ambiental. Chu (2020) também corrobora essa relação, evidenciando que o consumo de energias renováveis contribui para a redução das emissões de CO₂, especialmente em países de média renda.

Os resultados também evidenciam que a qualidade regulatória é um importante vetor para a redução das emissões de carbono. Isto porque o coeficiente de RQ foi negativo e estatisticamente significativo em todos os modelos estimados. Os resultados mostram que um aumento de 1% em RQ estão associados a uma redução de 0,05% nas emissões de CO₂ e de 0,02% nas emissões de GEE. Observa-se que a presença de qualidade regulatória e institucional possibilita a implementação e o monitoramento de políticas ambientais, o que tende a favorecer a preservação ambiental. Países como o Reino Unido e a China adotaram regulamentações ambientais mais rigorosas que resultaram em reduções significativas de emissões. No Reino Unido, com a implementação da política Preço de Piso do Carbono (UK Carbon Floor Price), registrou-se, nas últimas décadas, uma queda expressiva nas emissões poluentes (MacDonald et al., 2023). Na China, a introdução da política comercial de carbono (Carbon Trade Policy – CTP) teve efeitos significativos na qualidade da economia de baixo carbono, especialmente nas regiões com alta proporção de consumo de energia intensiva em carbono ou forte participação da indústria secundária (Gao, 2023), reforçando a hipótese de que regulações sólidas contribuem para a mitigação das emissões poluentes. Esses achados estão em consonância com os estudos de Ibrahim et al. (2022) e Oteng-Abayie et al. (2022) e confirmam a hipótese H₅ de que maior qualidade institucional está associada à redução da degradação ambiental.

Por outro lado, os resultados apontam que o desenvolvimento financeiro (FD) impacta a qualidade ambiental de forma adversa, uma vez que FD apresentou coeficiente positivo e estatisticamente significativo em todos os modelos. Esse resultado não confirma a hipótese H₆ e indica que a expansão do desenvolvimento financeiro intensifica as emissões. O aumento de 1% em FD resulta em um aumento de 0,25% a 0,28% nas emissões de CO₂ e de 0,41% a 0,45% nas emissões de GEE, sugerindo que, à medida que o desenvolvimento financeiro cresce, há uma tendência de maior pressão sobre as emissões poluentes. Isto pode ser explicado pelo aumento na atividade industrial. O estudo de Zhang (2011) demonstra que o desenvolvimento financeiro da China tem sido um importante motor para o aumento das emissões de carbono, uma vez que a ampliação do crédito e dos investimentos destinados às indústrias pesadas tem contribuído de forma significativa para o aumento do consumo energético e das emissões poluentes. Adicionalmente, Zhang (2011) destaca que, em regiões com maior participação da indústria secundária, a relação entre FD e emissões tende a ser mais intensa, refletindo as maiores necessidades de financiamento desses setores.

Ademais, a expansão do consumo via disponibilização de crédito e novos investimentos em setores que, em sua maioria, não adotam tecnologias sustentáveis ou práticas ecológicas elevam as emissões poluentes. Por exemplo, a implementação da Iniciativa Cinturão e Rota (Belt and Road Initiative – BRI), apoiada por financiamentos de bancos chineses destinados à infraestrutura, energia e indústrias pesadas, resultou em um aumento significativo das emissões de carbono, sobretudo em países com menor regulação ambiental (Weili et al., 2022). Além disso, Weili et al. (2022) indicam que uma parcela significativa dos investimentos associados à BRI foi direcionada a indústrias pesadas e a usinas termelétricas a carvão, setores que contribuem diretamente para o aumento das emissões de poluentes. Frente ao exposto, verifica-se que o desenvolvimento financeiro engendra um modelo de crescimento econômico que não leva em consideração práticas sustentáveis. Este resultado está em linha com os achados de Murshed e Dao (2022), Saud et al. (2023) e Mahzar e Majeed (2022).

Os efeitos da inovação tecnológica (TEC) revelam-se sensíveis à especificação dos modelos e ao indicador ambiental utilizado. Nos modelos em que as emissões de CO₂ são a variável dependente, observa-se que o coeficiente de TEC não é estatisticamente significativo no Modelo 1, enquanto assume sinal positivo e significância estatística nos Modelos 2 e 3. Esse resultado indica que os avanços tecnológicos estão associados ao aumento das emissões de CO₂, sugerindo que o progresso tecnológico, quando orientado predominantemente à expansão da capacidade produtiva, pode intensificar o uso de energia e recursos naturais, em detrimento da eficiência ambiental. Evidência semelhante é encontrada em Usman e Hammar (2021), ao passo que estudos como Rahman et al. (2022) e Adebayo et al. (2022) apontam efeitos mitigadores da tecnologia sobre as emissões, destacando que esse impacto depende fortemente do ambiente institucional e do direcionamento das inovações.

Resultados análogos emergem nos Modelos 4, 5 e 6. Nesse conjunto de estimações, o coeficiente de TEC apresenta sinal negativo e significância estatística no Modelo 4, sugerindo um efeito mitigador da inovação tecnológica sobre as emissões de GEE. Contudo, nos Modelos 5 e 6, o coeficiente torna-se positivo e estatisticamente significativo, reforçando a evidência de que o impacto da inovação tecnológica pode variar conforme a especificação econométrica e o contexto analítico. Em conjunto, esses resultados levam à rejeição da hipótese H₃, indicando que a inovação tecnológica, por si só, não garante reduções sistemáticas das emissões ambientais.

Por outro lado, a inclusão do termo de interação entre desenvolvimento financeiro e inovação tecnológica (FD_TEC) nos Modelos 2, 3, 5 e 6 revela um padrão robusto e consistente. Em todas as especificações, o coeficiente de FD_TEC é negativo e estatisticamente

significativo tanto para as emissões de CO₂ quanto para as de GEE. Em termos quantitativos, um aumento unitário em FD_TEC está associado a reduções de 1,83% a 1,92% nas emissões de CO₂ e de 1,34% a 1,59% nas emissões de GEE. Em outros termos, observa-se que o desenvolvimento financeiro, quando associado ao avanço tecnológico, contribui para mitigar as emissões poluentes. Esse resultado sugere que economias com maior desenvolvimento financeiro promovem investimentos em tecnologias mais limpas e eficientes, o que reduz a emissão poluentes.

Por exemplo, o estudo de Feng et al. (2022) mostra que, na China, o avanço da inclusão financeira digital aumentou significativamente o número de patentes verdes, indicando maior inovação em tecnologias de eficiência energética, controle da poluição e reciclagem. Os autores estimam que um aumento de 1% no nível de desenvolvimento financeiro digital está associado a um crescimento de 1,7% no número de patentes verdes. O efeito é mais pronunciado em pequenas empresas, em regiões com alta intensidade de emissões e em áreas com forte presença da indústria manufatureira, sugerindo que o acesso ampliado ao crédito e a redução de assimetrias de informação viabilizam investimentos em processos e produtos menos poluentes (Feng et al., 2022).

Outro exemplo é evidenciado pelo estudo de Chiu e Lee (2020), que aponta que, nos países da OCDE, melhorias no funcionamento dos mercados financeiros estiveram associadas a aumentos significativos na implantação de tecnologias de energias renováveis, especialmente nas fontes eólica e solar. Esse avanço é impulsionado pela maior disponibilidade de capital privado para setores verdes que complementam os recursos públicos e aceleram a transição para uma economia de baixo carbono (Chiu e Lee, 2020). Além disso, a análise realizada em 79 países indicou que a redução das restrições financeiras permite que as empresas invistam mais em pesquisa e desenvolvimento, promovendo a adoção de tecnologias produtivas mais limpas (Chiu e Lee, 2020). Nota-se, portanto, que o desenvolvimento financeiro atua como um fator moderador, capaz de direcionar o progresso tecnológico para inovações ambientalmente sustentáveis.

Ao expandir a análise para amostras desagregadas, emergem resultados relevantes que revelam padrões entre os grupos de países. No Cluster 1, composto por economias avançadas, os resultados indicam a validade da Curva Ambiental de Kuznets no formato “U” invertido. Os coeficientes associados a $\ln_GDP$ são positivos e estatisticamente significativos, enquanto o termo quadrático apresenta sinal negativo e significância estatística em ambos os modelos estimados. Em termos econômicos, esses resultados sugerem que, mesmo entre economias avançadas, o crescimento econômico inicial está associado ao aumento das emissões de CO₂,

mas que, a partir de determinado nível de renda, essa relação se inverte, refletindo ganhos em eficiência produtiva, maior rigor regulatório e a adoção de tecnologias mais limpas.

Tabela 13 - Resultados de regressão do Cluster 1

<i>Cluster 1: Economias Avançadas</i>		
<i>Dependent variable: ln_CO2</i>		
	Modelo Base	Modelo Interação
ln_GDP	3.903** (1.600)	3.907** (1.585)
ln_GDP2	-0.183** (0.076)	-0.183** (0.075)
ECI	0.226 (0.209)	0.224 (0.216)
REN	-3.040*** (0.227)	-3.040*** (0.227)
RQ	0.023 (0.029)	0.023 (0.029)
TEC	-0.420*** (0.090)	-0.332 (0.568)
FD	-0.092 (0.119)	-0.090 (0.127)
FD_TEC		-0.104 (0.665)
<i>Note:</i> *p<0.1; **p<0.05; ***p<0.01		

Fonte: Elaborado pelos autores

No que se refere às demais variáveis, o consumo de energias renováveis (REN) apresenta um coeficiente negativo e altamente significativo, indicando que a expansão da matriz energética limpa desempenha papel central na mitigação das emissões nos países avançados. Em contraste, a qualidade regulatória (RQ) e o desenvolvimento financeiro (FD) não se mostram estatisticamente significativos, sugerindo que, nesse grupo de países, tais fatores já se encontram relativamente consolidados e, portanto, exercem menor variabilidade explicativa sobre as emissões. A inovação tecnológica (TEC) apresenta efeito negativo e estatisticamente significativo apenas no modelo base, indicando que, em economias avançadas, os avanços tecnológicos tendem a contribuir para a redução das emissões, embora esse efeito perca

robustez quando se considera a interação com o desenvolvimento financeiro. O termo de interação FD_TEC, por sua vez, não se mostra estatisticamente significativo, sugerindo que, nesse cluster, a articulação entre finanças e tecnologia já se encontra madura e não gera efeitos marginais adicionais sobre a qualidade ambiental.

Tabela 14 - Resultados de regressão do Cluster 2

<i>Cluster 2: Intermediários</i>		
<i>Dependent variable: ln_CO2</i>		
	Modelo Base	Modelo Interação
ln_GDP	0.216 (0.203)	0.156 (0.212)
ln_GDP2	0.009 (0.011)	0.012 (0.012)
ECI	-0.011 (0.121)	-0.019 (0.118)
REN	-2.096*** (0.151)	-2.067*** (0.154)
RQ	0.081*** (0.021)	0.082*** (0.021)
TEC	0.058** (0.027)	1.463*** (0.520)
FD	0.220** (0.105)	0.232** (0.103)
FD_TEC		-2.103*** (0.796)
<i>Note:</i> *p<0.1; **p<0.05; ***p<0.01		

Fonte: Elaborado pelos autores

No Cluster 2, composto por economias intermediárias, os resultados não fornecem evidências empíricas que sustentem a validade da Curva Ambiental de Kuznets. Os coeficientes de ln_GDP e ln_GDP² não são estatisticamente significativos em nenhum dos modelos estimados, indicando que, para esse grupo de países, o crescimento econômico, isoladamente, não explica de forma sistemática a dinâmica das emissões de CO₂. Esse resultado sugere que economias intermediárias apresentam trajetórias ambientais mais heterogêneas, fortemente influenciadas por fatores estruturais, institucionais e energéticos.

Nesse cluster, o consumo de energias renováveis (REN) mantém um coeficiente negativo e estatisticamente significativo, reforçando seu papel mitigador das emissões. Por outro lado, a qualidade regulatória (RQ) apresenta coeficiente positivo e significativo, indicando que melhorias regulatórias estão associadas ao aumento das emissões. Esse resultado pode refletir um efeito de curto prazo, em que o fortalecimento institucional acompanha processos de industrialização e expansão produtiva ainda intensivos em carbono. A inovação tecnológica (TEC) apresenta sinal positivo e significância estatística, sobretudo no modelo com interação, sugerindo que os avanços tecnológicos, quando não direcionados explicitamente à sustentabilidade, tendem a intensificar o uso de energia e as emissões. O desenvolvimento financeiro (FD) também exerce um efeito positivo e significativo, indicando que a expansão do crédito e dos investimentos pode estar sendo direcionada a setores poluentes. No entanto, a inclusão do termo FD_TEC revela um resultado relevante: a interação entre desenvolvimento financeiro e inovação tecnológica apresenta um coeficiente negativo e estatisticamente significativo, indicando que, quando combinados, esses fatores contribuem para a redução das emissões. Esse achado sugere que, nas economias intermediárias, o sistema financeiro pode desempenhar um papel decisivo ao direcionar o progresso tecnológico para aplicações mais limpas.

Tabela 15 - Resultados de regressão do Cluster 3

<i>Cluster 3: Baixa Complexidade</i>		
<i>Dependent variable: ln_CO2</i>		
	Modelo Base	Modelo Interação
ln_GDP	2.243*** (0.384)	1.919*** (0.311)
ln_GDP2	-0.106*** (0.026)	-0.084*** (0.021)
ECI	-0.403*** (0.139)	-0.301*** (0.114)
REN	-1.795*** (0.221)	-2.006*** (0.186)
RQ	-0.126*** (0.022)	-0.115*** (0.020)
TEC	9.954 (8.346)	6.505 (7.877)
FD	0.516***	0.414***

	(0.108)	(0.082)
FD_TEC		-12.927
		(12.385)

Note: *p<0.1; **p<0.05; ***p<0.01

Fonte: Elaborado pelos autores

Por fim, no Cluster 3, composto por economias de baixa complexidade e menor capacidade estrutural, os resultados evidenciam novamente a validade da Curva Ambiental de Kuznets no formato de “U” invertido. Os coeficientes de $\ln_GDP$ são positivos e estatisticamente significativos, enquanto $\ln_GDP^2$ apresenta sinal negativo e elevada significância estatística em ambos os modelos. Esses resultados indicam que, nesses países, o crescimento econômico inicial intensifica fortemente as emissões, refletindo estruturas produtivas intensivas em recursos naturais e energia fóssil, mas que há indícios de reversão parcial desse efeito à medida que a renda aumenta.

Diferentemente dos demais clusters, a complexidade econômica (ECI) apresenta coeficiente negativo e estatisticamente significativo, indicando que ganhos em sofisticação produtiva exercem papel central na mitigação das emissões em economias menos complexas. O consumo de energias renováveis (REN) e a qualidade regulatória (RQ) também apresentam efeitos negativos e robustos, reforçando a importância da transição energética e do fortalecimento institucional nesse grupo de países. Em contrapartida, o desenvolvimento financeiro (FD) apresenta coeficiente positivo e estatisticamente significativo, sugerindo que a expansão financeira tende a ampliar as emissões ao financiar atividades produtivas intensivas em carbono. A inovação tecnológica (TEC), embora apresente coeficiente positivo elevado, não se mostra estatisticamente significativa, o que pode refletir limitações na absorção tecnológica e na difusão de inovações eficientes nesses países. O termo de interação FD_TEC também não é estatisticamente significativo, indicando que, em economias de baixa complexidade, a articulação entre finanças e tecnologia ainda não é suficiente para gerar benefícios ambientais consistentes.

Em síntese, os resultados dos modelos desagregados evidenciam forte heterogeneidade nos determinantes das emissões de CO₂, reforçando a importância de abordagens que considerem o nível de desenvolvimento e a estrutura produtiva dos países. Enquanto nas economias avançadas a mitigação das emissões está fortemente associada à transição energética e à maturidade tecnológica, nas economias intermediárias e de baixa complexidade o papel do desenvolvimento financeiro, da qualidade institucional e da complexidade econômica assume

relevância distinta, indicando que políticas ambientais devem ser calibradas de acordo com as especificidades estruturais de cada grupo de países.

3.4.3. Discussão e Implicações Políticas

Os resultados empíricos deste estudo oferecem evidências robustas acerca dos determinantes da degradação ambiental, tanto a partir dos modelos estimados para amostra geral quanto das análises desagregadas por grupos de países. De forma geral, os achados confirmam a validade da EKC para emissões de CO₂ e de gases de efeito estufa, indicando que o crescimento econômico tende a intensificar a degradação ambiental nos estágios iniciais de desenvolvimento, mas passa a exercer efeito mitigador a partir de determinado nível de renda. Nos modelos desagregados, observa-se que esse padrão é mais consistente nos grupos de países avançados e de baixa complexidade, enquanto nos países intermediários a relação entre renda e emissões não se mostrou estatisticamente significativa, sugerindo que diferenças estruturais e institucionais podem condicionar a dinâmica da EKC.

No que se refere à complexidade econômica, os modelos gerais indicam que maiores níveis de sofisticação produtiva estão associados à redução das emissões ambientais, reforçando a hipótese de que economias mais diversificadas tendem a incorporar tecnologias mais eficientes e menos poluentes. Essa evidência é corroborada, sobretudo, nos países de baixa complexidade, nos quais o aumento da complexidade econômica exerce um efeito mitigador significativo sobre as emissões, indicando que avanços na estrutura produtiva podem gerar ganhos ambientais relevantes nesses contextos. Em contraste, nos países avançados e intermediários, o efeito da complexidade econômica se mostrou não significativo, que pode ser justificado pela pequeno tamanho da amostra e baixa variabilidade dos dados, após a desagregação da amostra geral.

Os resultados relacionados ao consumo de energias renováveis são consistentes em todas as especificações, evidenciando efeitos negativos e estatisticamente significativos tanto nos modelos agregados quanto nos desagregados. Em particular, observa-se que o impacto mitigador das energias renováveis é mais intenso nos países avançados e intermediários, refletindo maior capacidade de incorporação dessas fontes às matrizes energéticas. Nos países de baixa complexidade, embora o efeito permaneça negativo, sua magnitude relativamente menor sugere limitações estruturais e tecnológicas que restringem o potencial de redução das emissões.

O efeito da qualidade regulatória emerge como um resultado crucial nessa pesquisa. Nos modelos gerais, a variável apresenta efeito negativo e estatisticamente significativo sobre as emissões, indicando que ambientes institucionais mais robustos contribuem de forma

consistente para a mitigação da degradação ambiental. A análise desagregada reforça esse achado ao evidenciar que o efeito da qualidade regulatória é particularmente pronunciado nos países intermediários e de baixa complexidade, onde melhorias institucionais indicam um papel crucial na orientação do crescimento econômico para padrões menos poluentes. Nos países avançados, por sua vez, o efeito se mostra mais estável, sugerindo que níveis elevados de qualidade regulatória já se encontram internalizados na estrutura desses países.

Em relação à inovação tecnológica e ao desenvolvimento financeiro, os modelos gerais indicam que ambas as variáveis, quando consideradas isoladamente, tendem a intensificar as emissões ambientais, sugerindo que o avanço tecnológico e a expansão financeira, na ausência de direcionamento adequado, podem ampliar a pressão sobre o meio ambiente. Esse resultado é corroborado, sobretudo, nos países intermediários e de baixa complexidade, onde o desenvolvimento financeiro e a inovação tecnológica estão associados ao aumento das emissões, refletindo estruturas produtivas mais intensivas em recursos naturais e energia. Em contrapartida, nos países avançados, os efeitos individuais das inovações tecnológicas apresentaram um efeito mitigador nas emissões poluentes no modelo sem interação, indicando que países com maior maturidade tecnológica tendem a apresentar um desenvolvimento econômico mais sustentável.

A principal contribuição empírica desta dissertação reside na análise do termo de interação entre desenvolvimento financeiro e inovação tecnológica. Nos modelos agregados, a interação apresentou efeito negativo e estatisticamente significativo tanto para as emissões de CO₂ quanto para as de GEE, evidenciando que a combinação entre um sistema financeiro desenvolvido e o progresso tecnológico contribui para a redução das emissões. A análise desagregada aprofunda esse resultado ao demonstrar que esse efeito é particularmente robusto nos países intermediários, nos quais o fortalecimento do sistema financeiro, quando articulado ao investimento tecnológico, desempenha papel crucial na mitigação das emissões. Nos países avançados, embora o sinal da interação seja negativo, a ausência de significância estatística pode ser explicada pela baixa variabilidade dos níveis de desenvolvimento financeiro e tecnológico. Já nos países de baixa complexidade, o coeficiente positivo e não significativo sugere que limitações estruturais e institucionais restringem a capacidade do sistema financeiro de direcionar recursos para inovações ambientalmente eficientes.

Frente ao exposto, os resultados empíricos desta dissertação fornecem subsídios relevantes para a formulação de políticas públicas voltadas à promoção do crescimento econômico sustentável e à mitigação da degradação ambiental, destacando que a efetividade dessas políticas depende, em grande medida, do estágio de desenvolvimento econômico e

institucional de cada país. As evidências obtidas a partir dos modelos empregados indicam que estratégias homogêneas tendem a gerar resultados assimétricos, reforçando a necessidade de abordagens específicas, conforme o nível de desenvolvimento de cada país.

Frente ao exposto, os resultados empíricos dessa dissertação fornecem subsídios para um conjunto de diretrizes estratégicas que podem servir de base para a formulação de políticas públicas voltadas à promoção do crescimento econômico sustentável e à mitigação da degradação ambiental.

Em primeiro lugar, o fortalecimento da sofisticação produtiva emerge como um eixo central das estratégias de desenvolvimento sustentável, sobretudo em países de menor complexidade econômica. Os resultados indicam que avanços na estrutura produtiva nesses países geram ganhos ambientais significativos, o que sugere a priorização de políticas industriais voltadas à diversificação produtiva e ao estímulo a setores de maior valor agregado e menor intensidade de carbono. Entre as medidas possíveis estão incentivos fiscais e creditícios à produção e exportação de bens tecnologicamente sofisticados, apoio à diversificação produtiva e investimentos em infraestrutura de ciência e pesquisa. Considerando que produções mais complexas são intensivas em conhecimento, torna-se imprescindível implementar políticas robustas de fortalecimento educacional, abrangendo desde a melhoria da educação básica até a expansão e qualificação do ensino técnico e superior. Dessa forma, medidas de investimento estrutural, acompanhadas de um fortalecimento dos sistemas educacionais, mostram-se particularmente relevantes para viabilizar essa transição. Nos países intermediários e avançados, por sua vez, tais políticas tendem a assumir papel complementar, focando na consolidação e no aprimoramento de estruturas produtivas já maduras.

Em segundo lugar, os resultados evidenciam que a integração entre desenvolvimento financeiro e inovação tecnológica constitui um mecanismo chave para a mitigação das emissões, especialmente nas economias intermediárias. Enquanto o desenvolvimento financeiro e o avanço tecnológico, quando considerados isoladamente, tendem a ampliar a pressão ambiental, sua interação mostrou-se capaz de reverter esse efeito. Esse achado indica que políticas de fomento à inovação devem ser acompanhadas por instrumentos financeiros capazes de direcionar recursos para tecnologias ambientalmente eficientes. Nesse sentido, a criação de linhas de crédito verde, fundos de investimento voltados à inovação sustentável e programas de apoio à pesquisa aplicada em tecnologias limpas apresentam-se como estratégias eficazes, principalmente em países com sistemas financeiros em processo de consolidação.

Outro resultado central refere-se ao papel da qualidade regulatória e institucional. As evidências indicam que melhorias institucionais exercem efeitos mitigadores relevantes sobre

as emissões, sobretudo nos países intermediários e de menor complexidade, nos quais a consolidação de marcos regulatórios ainda desempenha papel decisivo na orientação do crescimento econômico sustentável. Nesse contexto, políticas voltadas ao aprimoramento da fiscalização ambiental, à aplicação efetiva das normas e ao fortalecimento da governança regulatória podem gerar ganhos ambientais expressivos. Além disso, instrumentos econômicos, como sistemas de precificação de carbono, créditos de carbono e taxas ambientais, também se mostram relevantes para alinhar incentivos privados aos objetivos ambientais, especialmente em economias onde a regulação ainda não se encontra plenamente internalizada. Por outro lado, em economias avançadas, nas quais as instituições e os marcos regulatórios já se encontram consolidados, os efeitos da qualidade regulatória sobre as emissões tendem a ser menos evidentes, uma vez que tais mecanismos já estão internalizados no sistema regulatório desses países

A transição para matrizes energéticas mais limpas constitui outro vetor fundamental para o desenvolvimento sustentável, reforçando a necessidade de ampliar o crédito direcionado à expansão e modernização da infraestrutura energética de baixo carbono. Nesse sentido, políticas públicas voltadas ao financiamento de projetos de geração, transmissão e armazenamento de energias renováveis tendem a potencializar os efeitos mitigatórios observados. Contudo, os resultados desagregados indicam que, nos países de menor complexidade econômica, tais efeitos são menos expressivos, o que reflete limitações estruturais associadas à menor capacidade tecnológica e institucional. Para esses países, a ampliação do uso de fontes renováveis demanda políticas complementares, como investimentos em infraestrutura básica, financiamento direcionado a transição energética, políticas de capacitação técnica e transferência internacional de tecnologia, de modo a superar restrições estruturais e criar as condições necessárias para que a expansão das energias renováveis produza impactos ambientais mais expressivos e sustentáveis no longo prazo.

Por fim, os resultados encontrados sugerem a adoção de abordagens multidimensionais e coordenadas na formulação das políticas públicas. Isso significa integrar dimensões econômicas, tecnológicas, energéticas e institucionais em estratégias de médio e longo prazo, evitando políticas isoladas que possam gerar efeitos colaterais indesejados. A coordenação entre diferentes níveis de governo, a criação de mecanismos interinstitucionais e o fortalecimento da cooperação internacional em financiamento climático e difusão tecnológica mostram-se especialmente relevantes para ampliar a efetividade das estratégias de mitigação ambiental, respeitando as especificidades estruturais e institucionais de cada grupo de países.

3.5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os efeitos adversos associados à intensificação das emissões poluentes reforçam a centralidade do debate entre crescimento econômico e sustentabilidade ambiental. Nesse contexto, o presente estudo examinou a validade da hipótese EKC e o papel da complexidade econômica na degradação ambiental, em 104 países no período de 1990 a 2021, considerando tanto as emissões de CO₂ quanto as de gases de efeito estufa. Além da análise agregada, os resultados foram examinados de forma desagregada, permitindo identificar heterogeneidades relevantes entre grupos de países. Adicionalmente, investigou-se o efeito da interação entre o desenvolvimento financeiro e a inovação tecnológica sobre as emissões, ampliando a compreensão dos mecanismos pelos quais fatores estruturais e financeiros influenciam a dinâmica ambiental.

Os resultados empíricos confirmam a validade da hipótese tradicional da EKC em formato de U invertido, indicando que, em estágios iniciais do desenvolvimento, o crescimento econômico tende a intensificar as emissões, enquanto, a partir de determinado nível de renda, esse efeito se reverte, contribuindo para a redução da degradação ambiental. Por outro lado, não foram encontradas evidências estatísticas robustas que sustentem a hipótese da Curva Ambiental de Kuznets em formato de N, sugerindo que, para o período e a amostra analisados, não se observa uma retomada sistemática do crescimento das emissões em níveis mais elevados de renda. Esses achados evidenciam que a trajetória entre crescimento econômico e degradação ambiental é condicionada por fatores estruturais e institucionais, e não apenas pela trajetória da renda per capita.

Os resultados também reforçam que a redução das emissões está associada à articulação de múltiplas dimensões, envolvendo a estrutura produtiva, o avanço da transição energética e a interação entre o desenvolvimento financeiro e a inovação tecnológica. Em particular, a complexidade econômica apresentou efeito mitigador sobre as emissões nos modelos gerais e, de forma mais pronunciada, nos países de baixa complexidade, sugerindo que avanços na sofisticação produtiva nesses contextos podem gerar ganhos ambientais expressivos. Ademais, a interação entre sistema financeiro e progresso tecnológico apresentou efeito mitigador significativo nos modelos gerais e, de forma mais consistente, nos países em estágio intermediário de desenvolvimento, indicando que a eficiência na alocação de recursos financeiros potencializa os efeitos ambientais positivos da inovação. Esse resultado ressalta a importância de mecanismos financeiros capazes de direcionar investimentos para tecnologias ambientalmente mais eficientes, sobretudo em economias que se encontram em processo de transição estrutural.

Adicionalmente, a transição para matrizes energéticas mais limpas mostrou-se um fator central para mitigar a degradação ambiental. A expansão do uso de energias renováveis teve efeitos negativos e estatisticamente significativos sobre as emissões em todos os modelos estimados, evidenciando seu papel como um dos principais vetores de redução das emissões poluentes. De forma complementar, os resultados indicam que a qualidade regulatória desempenha papel relevante ao criar um ambiente institucional favorável à adoção de tecnologias limpas, ao cumprimento das normas ambientais e à internalização dos custos ambientais da atividade econômica.

Em síntese, os achados deste estudo indicam que a mitigação da degradação ambiental não resulta exclusivamente do crescimento econômico ou da inovação tecnológica isoladamente, mas da interação entre estrutura produtiva, qualidade institucional, e desenvolvimento financeiro orientado a inovações verdes. O crescimento pode, de fato, tornar-se ambientalmente compatível, desde que sustentado por bases estruturais que favoreçam a complexidade econômica, a difusão de tecnologias limpas e a alocação eficiente de recursos financeiros. Esses resultados reforçam a necessidade de estratégias de desenvolvimento integradas e diferenciadas, capazes de considerar as heterogeneidades entre países e de promover trajetórias de crescimento econômico alinhadas à sustentabilidade ambiental no longo prazo.

Contudo, apesar das contribuições empíricas, este estudo apresenta algumas limitações que podem orientar investigações futuras. A proxy de inovação tecnológica, baseada no número de patentes, pode não capturar plenamente a qualidade, a difusão e a efetiva aplicação das inovações nos processos produtivos, o que sugere a adoção de indicadores alternativos. Além disso, embora tenham sido consideradas as emissões de CO₂ e de gases de efeito estufa (GEE), pesquisas futuras podem ampliar a análise por meio de indicadores ambientais complementares, como emissões de metano, pegada ecológica e pegada de carbono, de modo a capturar dimensões alternativas da degradação ambiental. Ademais, essa pesquisa adota apenas uma técnica de estimação econométrica, o que pode limitar a robustez dos resultados. A utilização de metodologias adicionais, como a regressão por quartis e modelos com efeito de limiar (*threshold models*), pode contribuir para o aprofundamento e a validação dos resultados aqui apresentados.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS DA DISSERTAÇÃO

A presente dissertação teve como propósito central investigar a relação entre crescimento econômico e degradação ambiental à luz da Curva Ambiental de Kuznets, incorporando à análise aspectos estruturais e institucionais por meio da variável de complexidade econômica e de medidas públicas associadas à inovação, ao desenvolvimento financeiro e qualidade regulatória. A motivação parte da constatação de que, embora a EKC seja uma das abordagens mais difundidas para explicar a relação entre renda e impacto ambiental, ela frequentemente negligencia os mecanismos produtivos e institucionais que moldam essa dinâmica. Nesse contexto, esta pesquisa contribui para o avanço do debate sobre desenvolvimento sustentável ao propor uma abordagem mais abrangente, empírica e teoricamente fundamentada.

O primeiro artigo que compõe essa dissertação realizou uma revisão sistemática e bibliométrica da literatura recente (2017–2024), com o propósito de mapear os principais estudos que abordam a EKC em articulação com variáveis da estrutura produtiva dos países. A análise revelou que, embora haja um aumento no número de pesquisas que integram a EKC a indicadores de diversificação e complexidade produtiva, ainda não há consenso quanto aos efeitos da complexidade econômica sobre a degradação ambiental. Verificou-se, ainda, uma escassez de estudos que incorporem dimensões como a inovação tecnológica, a estrutura industrial, o desenvolvimento financeiro e a qualidade institucional aos modelos empíricos da EKC. A revisão também destacou a carência de abordagens que considerem a interação entre variáveis como elemento explicativo, bem como a predominância do uso das emissões de CO₂ como única *proxy* de degradação ambiental. Esses achados evidenciam a necessidade de investigações mais abrangentes e analiticamente refinadas, capazes de capturar as múltiplas dimensões que influenciam a relação entre o crescimento econômico e a qualidade ambiental.

O segundo artigo foi elaborado com base nas lacunas empíricas identificadas na revisão sistemática. A análise investiga os determinantes estruturais e institucionais da degradação ambiental em uma amostra de 104 países, no período de 1990 a 2021, considerando as emissões de CO₂ e de gases de efeito estufa. Os resultados confirmaram a validade da hipótese tradicional da EKC em formato de U invertido, sem evidências robustas de uma trajetória em formato de N. Ademais, os dados indicaram que a complexidade econômica exerce efeito mitigador sobre as emissões nos modelos gerais e, de forma mais pronunciada, nos países de baixa complexidade, o que sugere que avanços na sofisticação produtiva nesses contextos podem gerar ganhos ambientais relevantes. Além disso, as evidências empíricas reforçaram a importância da qualidade regulatória e do consumo de energia renovável como mecanismos

efetivos de mitigação ambiental.

A principal contribuição dessa pesquisa refere-se ao efeito do termo de interação entre desenvolvimento financeiro e inovação tecnológica, que apresentou impacto mitigador estatisticamente significativo nos modelos agregados e, de forma mais consistente, nos países em estágio intermediário de desenvolvimento. Esse resultado evidencia que a redução das emissões não decorre automaticamente do progresso tecnológico ou da expansão financeira isoladamente, mas da articulação entre ambos, quando mecanismos financeiros direcionam recursos para inovações ambientalmente mais eficientes. Assim, o estudo demonstra que a interação entre a estrutura financeira e a capacidade tecnológica constitui um canal central para a transição rumo a trajetórias de crescimento mais sustentáveis, especialmente em economias em processo de transformação estrutural.

Ao avançar em relação às limitações identificadas na literatura, o estudo contribui para o preenchimento de lacunas relevantes no debate empírico sobre a Curva Ambiental de Kuznets. A ampliação da análise para além das emissões de CO₂, por meio da incorporação das emissões de gases de efeito estufa como *proxy* para degradação ambiental, responde às lacunas 3 e 6, associadas à escassez de indicadores ambientais alternativos e indicadores compostos. A inclusão explícita da inovação tecnológica, do desenvolvimento financeiro e de sua interação no arcabouço da EKC permite enfrentar as lacunas 5 e 8, ao explorar mecanismos estruturais e efeitos conjuntos ainda pouco investigados na literatura. Adicionalmente, a incorporação da qualidade regulatória como variável institucional central contribui para preencher a lacuna 9, ao capturar o papel da eficiência governamental na dinâmica ambiental. Por fim, a análise desagregada por grupos de países, baseada em critérios de desenvolvimento e complexidade econômica, endereça a lacuna 10, ao evidenciar heterogeneidades estruturais relevantes que permanecem ocultas em modelos gerais.

Diante disso, os achados empíricos desta dissertação reforçam a hipótese de que o crescimento econômico, por si só, não é suficiente para promover melhorias ambientais, sendo fundamental compreender as condições sob as quais esse crescimento ocorre. A análise integrada das dimensões produtivas e institucionais permite avançar para além da tradicional curva em U invertida proposta pela EKC, sinalizando que a transição para trajetórias sustentáveis depende da articulação entre uma estrutura produtiva sofisticada e políticas públicas eficazes. Nesse sentido, esta dissertação contribui para reposicionar o debate sobre sustentabilidade, deslocando o foco exclusivo do desenvolvimento econômico para uma perspectiva mais multidimensional e qualitativa do desenvolvimento.

Em síntese, a evidência empírica apresentada nesta pesquisa demonstra que a

combinação entre sofisticação produtiva, desenvolvimento financeiro, inovação tecnológica, qualidade regulatória e transição energética constitui o caminho mais promissor para alinhar crescimento econômico e preservação ambiental. A adoção das recomendações aqui propostas pode contribuir para que países em diferentes estágios de desenvolvimento avancem em direção a uma economia de baixo carbono, resiliente e sustentável.

Apesar das contribuições teóricas e empíricas desta dissertação, algumas limitações devem ser destacadas. No que se refere ao primeiro artigo, a revisão sistemática abrange estudos publicados até 2024, o que pode implicar a ausência de evidências mais recentes sobre a relação entre complexidade econômica e degradação ambiental. Ademais, a estratégia de busca adotou um conjunto específico de termos, o que pode não ter captado a literatura existente em sua totalidade. Quanto ao segundo artigo, as limitações metodológicas e empíricas já foram discutidas de forma detalhada em suas considerações finais, relacionadas principalmente às proxies utilizadas e às estratégias de estimação adotadas. Nesse sentido, pesquisas futuras podem avançar ao atualizar continuamente a evidência empírica disponível, ampliar os critérios de busca em revisões sistemáticas e explorar abordagens metodológicas complementares, de modo a aprofundar a compreensão dos mecanismos que conectam estrutura produtiva, instituições e desempenho ambiental.

Por fim, esta dissertação contribui para o fortalecimento do debate sobre desenvolvimento sustentável, ao evidenciar que trajetórias econômicas mais limpas e resilientes não são frutos automáticos do crescimento, mas sim resultados de decisões estratégicas baseadas na construção de capacidades produtivas, na qualidade das instituições e no desenho de políticas públicas comprometidas com a sustentabilidade. Ao ressaltar o papel dos principais fatores estruturais e institucionais que auxiliam na mitigação das emissões de poluentes, esta pesquisa ressalta a necessidade de repensar os caminhos possíveis para alinhar crescimento econômico e integridade ecológica, um desafio central para as próximas décadas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABID, Nabila *et al.* Financial development and green innovation, the ultimate solutions to an environmentally sustainable society: Evidence from leading economies. **Journal of Cleaner Production**, v. 369, p. 133223, out. 2022.

ACHEAMPONG, Alex O.; ADAMS, Samuel; BOATENG, Elliot. Do globalization and renewable energy contribute to carbon emissions mitigation in Sub-Saharan Africa? **Science of The Total Environment**, v. 677, p. 436–446, ago. 2019.

ADEBAYO, Tomiwa Sunday *et al.* Race to achieving sustainable environment in China: Can financial globalization and renewable energy consumption help meet this stride? **Science Progress**, v. 105, n. 4, p. 00368504221138715, out. 2022a.

ADEBAYO, Tomiwa Sunday *et al.* Dynamic effect of disintegrated energy consumption and economic complexity on environmental degradation in top economic complexity economies. **Energy Reports**, v. 8, p. 12832–12842, nov. 2022b.

ADEDOYIN, Festus Fatai; NWULU, Nnamdi; BEKUN, Festus Victor. Environmental degradation, energy consumption and sustainable development: Accounting for the role of economic complexities with evidence from World Bank income clusters. **Business Strategy and the Environment**, v. 30, n. 5, p. 2727–2740, jul. 2021.

ADEDOYIN, Festus Fatai; SATROVIC, Elma; KEHINDE, Maureen Njideka. The anthropogenic consequences of energy consumption in the presence of uncertainties and complexities: evidence from World Bank income clusters. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 29, n. 16, p. 23264–23279, abr. 2022.

ADGER, W. Neil *et al.* Climate change affects multiple dimensions of well-being through impacts, information and policy responses. **Nature Human Behaviour**, v. 6, n. 11, p. 1465–1473, 16 nov. 2022.

ADU, Kwaku; PUTHENKALAM, John Joseph; KWABEN, Antwi Effah. New Framework for Multidimensional Environmental Well-being for Sustainable Development. **Journal of African Development**, v. 24, n. 1, p. 136–173, 1 fev. 2023.

AFOLABI, Joshua Adeyemi. Natural resource rent and environmental quality nexus in Sub-Saharan Africa: Assessing the role of regulatory quality. **Resources Policy**, v. 82, p. 103488, maio 2023.

AGOZIE, Divine Q. *et al.* Environmental Kuznets Curve hypothesis from lens of economic complexity index for BRICS: Evidence from second generation panel analysis. **Sustainable Energy Technologies and Assessments**, v. 53, p. 102597, out. 2022.

AHMAD, Mahmood *et al.* Towards environmental sustainability in E–7 countries: Assessing the roles of natural resources, economic growth, country risk, and energy transition. **Resources Policy**, v. 82, p. 103486, maio 2023.

AHMED, Zahoor *et al.* Effects of economic complexity, economic growth, and renewable energy technology budgets on ecological footprint: the role of democratic accountability. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 29, n. 17, p. 24925–24940, abr. 2022.

AHMED, Zahoor; LE, Hoang Phong. Linking Information Communication Technology, trade globalization index, and CO2 emissions: evidence from advanced panel techniques. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 28, n. 7, p. 8770–8781, fev. 2021.

AHUTI, Singh. Industrial Growth and Environmental Degradation. **International Education and Research Journal**, v. 1, n. 5, p. 5–7, 2015.

AKHTAR, Nayab; RASHID, Abdul. Financial development and sustainable development: A review of literature. **Sustainable Development**, v. 32, n. 6, p. 7114–7139, dez. 2024.

AL-AYOUTY, Iman. Economic Complexity and Renewable Energy Effects on Carbon Dioxide Emissions: a Panel Data Analysis of Middle East and North Africa Countries. **Journal of the Knowledge Economy**, v. 15, n. 3, p. 12006–12025, 31 out. 2023.

ALI, Shahid *et al.* Exploring the linkage between export diversification and ecological footprint: evidence from advanced time series estimation techniques. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 29, n. 25, p. 38395–38409, maio 2022a.

ALI, Shahid *et al.* Exploring the linkage between export diversification and ecological footprint: evidence from advanced time series estimation techniques. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 29, n. 25, p. 38395–38409, maio 2022b.

ALVARADO, Rafael *et al.* Ecological footprint, economic complexity and natural resources rents in Latin America: Empirical evidence using quantile regressions. **Journal of Cleaner Production**, v. 318, p. 128585, out. 2021.

ALVAREZ-HERRANZ, Agustin *et al.* Energy innovation and renewable energy consumption in the correction of air pollution levels. **Energy Policy**, v. 105, p. 386–397, jun. 2017.

ANSER, Muhammad Khalid; APERGIS, Nicholas; SYED, Qasim Raza. Impact of economic policy uncertainty on CO2 emissions: evidence from top ten carbon emitter countries. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 28, n. 23, p. 29369–29378, jun. 2021.

ARIA, Massimo; CUCCURULLO, Corrado. bibliometrix : An R-tool for comprehensive science mapping analysis. **Journal of Informetrics**, v. 11, n. 4, p. 959–975, nov. 2017.

AWAN, Abdul Majid; AZAM, Muhammad. Evaluating the impact of GDP per capita on environmental degradation for G-20 economies: Does N-shaped environmental Kuznets curve exist? **Environment, Development and Sustainability**, v. 24, n. 9, p. 11103–11126, set. 2022.

BALSALOBRE-LORENTE, Daniel *et al.* The environmental Kuznets curve, based on the economic complexity, and the pollution haven hypothesis in PIIGS countries. **Renewable Energy**, v. 185, p. 1441–1455, fev. 2022.

BALSALOBRE-LORENTE, Daniel *et al.* The influence of economic complexity processes and renewable energy on CO2 emissions of BRICS. What about industry 4.0? **Resources Policy**, v. 82, p. 103547, maio 2023a.

BALSALOBRE-LORENTE, Daniel *et al.* Environmental impact of globalization: The case of central and Eastern European emerging economies. **Journal of Environmental Management**, v. 341, p. 118018, set. 2023b.

BARBIER, Edward. The policy challenges for green economy and sustainable economic development. **Natural Resources Forum**, v. 35, n. 3, p. 233–245, ago. 2011.

BASHEER, Muhammad Farhan *et al.* Does financial sector is helpful for curbing carbon emissions through the investment in green energy projects: evidence from MMQR approach. **Clean Technologies and Environmental Policy**, v. 26, n. 3, p. 901–921, mar. 2024.

BAUMERT, Kevin A.; HERZOG, Timothy; PERSHING, Jonathan. **Navigating the numbers: greenhouse gas data and international climate policy**. Washington, D.C: World Resources Institute, 2005.

BEN JEBLI, Mehdi; BEN YOUSSEF, Slim; OZTURK, Ilhan. Testing environmental Kuznets curve hypothesis: The role of renewable and non-renewable energy consumption and trade in OECD countries. **Ecological Indicators**, v. 60, p. 824–831, jan. 2016.

BORN, Benjamin; BREITUNG, Jörg. Testing for Serial Correlation in Fixed-Effects Panel Data Models. **Econometric Reviews**, v. 35, n. 7, p. 1290–1316, 8 ago. 2016.

BRETSCHGER, Lucas; VALENTE, Simone. Effective policy design for a sustainable economy. **European Economic Review**, v. 155, p. 104462, jun. 2023.

BREUSCH, T. S.; PAGAN, A. R. A Simple Test for Heteroscedasticity and Random Coefficient Variation. **Econometrica**, v. 47, n. 5, p. 1287, set. 1979.

BUCHER, Florian; SCHEU, Lucas; SCHRÖPF, Benedikt. Economic complexity and environmental pollution: evidence from the former socialist transition countries. **Empirica**, v. 50, n. 3, p. 807–847, ago. 2023.

CALDAROLA, Bernardo *et al.* Economic complexity and the sustainability transition: a review of data, methods, and literature. **Journal of Physics: Complexity**, v. 5, n. 2, p. 022001, 1 jun. 2024.

CALVIN, Katherine *et al.* **IPCC, 2023: Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland. [S.L.]**: Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 25 jul. 2023. Disponível em: <<https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/>>. Acesso em: 8 ago. 2025.

CAN, Muhlis; GOZGOR, Giray. The impact of economic complexity on carbon emissions: evidence from France. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 24, n. 19, p. 16364–16370, jul. 2017.

CAPORIN, Massimiliano *et al.* New insights on the environmental Kuznets curve (EKC) for Central Asia. **Empirical Economics**, v. 66, n. 5, p. 2335–2354, maio 2024.

CHEN, Yang; LEE, Chien-Chiang. Does technological innovation reduce CO2 emissions? Cross-country evidence. **Journal of Cleaner Production**, v. 263, p. 121550, ago. 2020.

CHEN, Zhongfei; HAO, Xinyue; ZHOU, Mengling. Does institutional quality affect air pollution? **Environmental Science and Pollution Research**, v. 29, n. 19, p. 28317–28338, abr. 2022.

CHIU, Yi-Bin; LEE, Chien-Chiang. Effects of financial development on energy consumption: The role of country risks. **Energy Economics**, v. 90, p. 104833, ago. 2020.

CHONG, Bao. K-means clustering algorithm: a brief review. **Academic Journal of Computing & Information Science**, v. 4, n. 5, 2021.

CHU, Lan Khanh. Economic structure and environmental Kuznets curve hypothesis: new evidence from economic complexity. **Applied Economics Letters**, v. 28, n. 7, p. 612–616, 16 abr. 2021.

COPELAND, Brian R.; TAYLOR, M. Scott. Trade, Growth, and the Environment. **Journal of Economic Literature**, v. 42, n. 1, p. 7–71, mar. 2004.

CUCCHIELLA, Federica *et al.* Recycling of WEEEs: An economic assessment of present and future e-waste streams. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 51, p. 263–272, nov. 2015.

DAUDA, Lamini *et al.* Innovation, trade openness and CO2 emissions in selected countries in Africa. **Journal of Cleaner Production**, v. 281, p. 125143, jan. 2021.

DINDA, Soumyananda. Environmental Kuznets Curve Hypothesis: A Survey. **Ecological Economics**, v. 49, n. 4, p. 431–455, ago. 2004.

DOĞAN, Buhari *et al.* Impacts of export quality on environmental degradation: does income matter? **Environmental Science and Pollution Research**, v. 27, n. 12, p. 13735–13772, abr. 2020.

DOĞAN, Buhari *et al.* How environmental taxes and carbon emissions are related in the G7 economies? **Renewable Energy**, v. 187, p. 645–656, mar. 2022.

DOĞAN, Buhari; SABOORI, Behnaz; CAN, Muhlis. Does economic complexity matter for environmental degradation? An empirical analysis for different stages of development. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 26, n. 31, p. 31900–31912, nov. 2019.

DRISCOLL, John C.; KRAAY, Aart C. Consistent Covariance Matrix Estimation with Spatially Dependent Panel Data. **Review of Economics and Statistics**, v. 80, n. 4, p. 549–560, nov. 1998.

EDO, Great Iruoghene *et al.* Impact of environmental pollution from human activities on water, air quality and climate change. **Ecological Frontiers**, v. 44, n. 5, p. 874–889, out. 2024.

EI KENAWY, Ahmed M. *et al.* A Preliminary Assessment of Global CO₂ : Spatial Patterns, Temporal Trends, and Policy Implications. **Global Challenges**, v. 7, n. 12, p. 2300184, dez. 2023.

FANG, Jianchun *et al.* Effects of the export product quality on carbon dioxide emissions: evidence from developing economies. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 26, n. 12, p. 12181–12193, abr. 2019.

FATAI ADEDOYIN, Festus *et al.* Environmental consequences of economic complexities in the EU amidst a booming tourism industry: Accounting for the role of brexit and other crisis events. **Journal of Cleaner Production**, v. 305, p. 127117, jul. 2021.

FEKETE, G.; NYÁRI, T.; KOZLOVSZKY, M. [Supporting role of the fibula in tibial fractures]. **Magyar Traumatologia, Orthopaedia Es Helyreallito Sebeszet**, v. 19, n. 1, p. 14–22, 1976.

FENG, Suling; ZHANG, Rong; LI, Guoxiang. Environmental decentralization, digital finance and green technology innovation. **Structural Change and Economic Dynamics**, v. 61, p. 70–83, jun. 2022.

FERRAZ, Diogo; PYKA, Andreas. Circular economy, bioeconomy, and sustainable development goals: a systematic literature review. **Environmental Science and Pollution Research**, 13 set. 2023.

FITZENBERGER, Bernd; WILKE, Ralf Andreas. Quantile Regression Methods. In: SCOTT, Robert A.; KOSSLYN, Stephan M. (Orgs.). **Emerging Trends in the Social and Behavioral Sciences**. 1. ed. [S.l.]: Wiley, 2015. p. 1–18.

FRIEDL, Birgit; GETZNER, Michael. Determinants of CO₂ emissions in a small open economy. **Ecological Economics**, v. 45, n. 1, p. 133–148, abr. 2003.

GAO, Ming. The impacts of carbon trading policy on China's low-carbon economy based on county-level perspectives. **Energy Policy**, v. 175, p. 113494, abr. 2023.

GOZGOR, Giray; CAN, Muhlis. Does export product quality matter for CO₂ emissions? Evidence from China. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 24, n. 3, p. 2866–2875, jan. 2017.

GROSSMAN, G. M.; KRUEGER, A. B. Economic Growth and the Environment. **The Quarterly Journal of Economics**, v. 110, n. 2, p. 353–377, 1 maio 1995.

GROSSMAN, Gene; KRUEGER, Alan. **Environmental Impacts of a North American Free Trade Agreement**. Cambridge, MA: National Bureau of Economic Research, nov. 1991. Disponível em: <<http://www.nber.org/papers/w3914.pdf>>. Acesso em: 28 jul. 2025.

GUJARATI, Damodar N.; PORTER, Dawn C. **Basic econometrics**. 5. ed ed. Boston, Mass.: McGraw-Hill Irwin, 2009.

GYAMFI, Bright Akwasi *et al.* Environmental implications of N-shaped environmental Kuznets curve for E7 countries. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 28, n. 25, p. 33072–33082, jul. 2021.

HARGROVES, Karlson (ORG.). **The natural advantage of nations: business opportunities, innovation and governance in the 21st century**. repr. ed. London: Earthscan, 2006.

HARTMANN, Dominik *et al.* Linking Economic Complexity, Institutions, and Income Inequality. **World Development**, v. 93, p. 75–93, maio 2017.

HAUSMAN, J. A. Specification Tests in Econometrics. **Econometrica**, v. 46, n. 6, p. 1251, nov. 1978.

HAUSMANN, Ricardo (ORG.). **The atlas of economic complexity: mapping paths to prosperity**. Updated edition ed. Cambridge, MA: The MIT Press, 2013.

HAUSMANN, Ricardo; HIDALGO, César A. The network structure of economic output. **Journal of Economic Growth**, v. 16, n. 4, p. 309–342, dez. 2011.

HIDALGO, Cesar A. **Discovering East Africa's Industrial Opportunities**. arXiv, , 1 mar. 2012. Disponível em: <<http://arxiv.org/abs/1203.0163>>. Acesso em: 28 jul. 2025

HIDALGO, César A.; HAUSMANN, Ricardo. The building blocks of economic complexity. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 106, n. 26, p. 10570–10575, 30 jun. 2009.

HIRSCH, Shana; RIBES, David. Innovation and legacy in energy knowledge infrastructures. **Energy Research & Social Science**, v. 80, p. 102218, out. 2021.

HOSONO, Akio. Industrial Development and Transformation: Insights from Outstanding Cases. In: HOSONO, Akio (Ed.). **SDGs, Transformation, and Quality Growth**. Sustainable Development Goals Series. Singapore: Springer Singapore, 2022. p. 39–73.

HOSSAIN, Mohammad Razib *et al.* Natural resource dependency and environmental sustainability under N-shaped EKC: The curious case of India. **Resources Policy**, v. 80, p. 103150, jan. 2023.

HSIAO, Cheng. **Analysis of panel data**. 3. ed ed. New York: Cambridge Univ. Press, 2014.

HUANG, Zilong; REN, Xiaocong. Impact of natural resources, resilient economic growth, and energy consumption on CO2 emissions. **Resources Policy**, v. 90, p. 104714, mar. 2024.

IBRAHIM, Mansor H.; LAW, Siong Hook. Institutional Quality and CO₂ Emission–Trade Relations: Evidence from Sub-Saharan Africa. **South African Journal of Economics**, v. 84, n. 2, p. 323–340, jun. 2016.

IBRAHIM, Ridwan Lanre *et al.* Exploring the nexuses of disintegrated energy consumption, structural change, and financial development on environmental sustainability in BRICS: Modulating roles of green innovations and regulatory quality. **Sustainable Energy Technologies and Assessments**, v. 53, p. 102529, out. 2022.

IKOTUN, Abiodun M. *et al.* K-means clustering algorithms: A comprehensive review, variants analysis, and advances in the era of big data. **Information Sciences**, v. 622, p. 178–210, abr. 2023.

IKRAM, Majid *et al.* Exploring the nexus between economic complexity, economic growth and ecological footprint: Contextual evidences from Japan. **Sustainable Energy Technologies and Assessments**, v. 47, p. 101460, out. 2021.

INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY, (IRENA). **Innovation Outlook: Thermal Energy Storage**. [S.l.: S.n.].

IRENA. **Innovation Outlook: Thermal Energy Storage**. Abu Dhabi: International Renewable Energy Agency (IRENA), nov. 2020. Disponível em: <<https://www.irena.org/publications/2020/Nov/Innovation-outlook-Thermal-energy-storage>>.

JAMWAL, Anbesh *et al.* Industry 4.0 Technologies for Manufacturing Sustainability: A Systematic Review and Future Research Directions. **Applied Sciences**, v. 11, n. 12, p. 5725, 20 jun. 2021.

JAYANTHAKUMARAN, Kankesu; VERMA, Reetu; LIU, Ying. CO2 emissions, energy consumption, trade and income: A comparative analysis of China and India. **Energy Policy**, v. 42, p. 450–460, mar. 2012.

JUDGE, George G. (ORG.). **The theory and practice of econometrics**. 2. ed., 7. [print.] ed. New York: Wiley, 1985.

KALPANA SONI. ENVIRONMENTAL POLLUTION CAUSES AND CONSEQUENCES. **Journal of Science Innovations and Nature of Earth**, p. 68–71, 25 mar. 2023.

KAO, Chihwa D.; CHIANG, Min-Hsieng. On the Estimation and Inference of a Cointegrated Regression in Panel Data. **SSRN Electronic Journal**, 1997.

KEARSLEY, Aaron; RIDDEL, Mary. A further inquiry into the Pollution Haven Hypothesis and the Environmental Kuznets Curve. **Ecological Economics**, v. 69, n. 4, p. 905–919, fev. 2010.

KHALIQ, Abdul; MAMKHEZRI, Jamal. Asymmetrical analysis of economic complexity and economic freedom on environment in South Asia: A NARDL approach. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 30, n. 38, p. 89049–89070, 14 jul. 2023.

KHAN, Salim; YAHONG, Wang; CHANDIO, Abbas Ali. How does economic complexity affect ecological footprint in G-7 economies: the role of renewable and non-renewable energy consumptions and testing EKC hypothesis. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 29, n. 31, p. 47647–47660, jul. 2022.

KHAN, Zeeshan *et al.* The roles of export diversification and composite country risks in carbon emissions abatement: evidence from the signatories of the regional comprehensive economic partnership agreement. **Applied Economics**, v. 53, n. 41, p. 4769–4787, 2 set. 2021.

KHEZRI, Mohsen; HESHMATI, Almas; KHODAEI, Mehdi. Environmental implications of economic complexity and its role in determining how renewable energies affect CO2 emissions. **Applied Energy**, v. 306, p. 117948, jan. 2022.

KILIÇ, Cüneyt; SOYYIĞIT, Semanur; BAYRAKDAR, Seda. Economic Complexity, Ecological Footprint, and the Environmental Kuznets Curve: Findings from Selected Industrialized Countries. **Journal of the Knowledge Economy**, v. 15, n. 2, p. 7402–7427, 23 maio 2023.

KOENKER, Roger. A note on studentizing a test for heteroscedasticity. **Journal of Econometrics**, v. 17, n. 1, p. 107–112, set. 1981.

KOSTAKIS, Ioannis; ARAUZO-CAROD, Josep-Maria. The key roles of renewable energy and economic growth in disaggregated environmental degradation: Evidence from highly developed, heterogeneous and cross-correlated countries. **Renewable Energy**, v. 206, p. 1315–1325, abr. 2023.

KRAUS, Sascha *et al.* Literature reviews as independent studies: guidelines for academic practice. **Review of Managerial Science**, v. 16, n. 8, p. 2577–2595, nov. 2022.

KRIPFGANZ, Sebastian; SCHNEIDER, Daniel C. ardl: Estimating autoregressive distributed lag and equilibrium correction models. **The Stata Journal: Promoting communications on statistics and Stata**, v. 23, n. 4, p. 983–1019, dez. 2023.

KUTNER, Michael H. (ORG.). **Applied linear statistical models**. 5. ed ed. Boston, Mass.: McGraw-Hill Irwin, 2005.

KUZNETS, Simon. Economic Growth and Income Inequality. **The American Economic Review**, v. 45, n. 1, p. 1–28, 1955.

LATIF, Nazia *et al.* Investigating the role of economic integration and financial development: Rebound effect and green ICT in BRICS. **Sustainable Futures**, v. 6, p. 100126, dez. 2023.

LAU, Lin-Sea *et al.* Environmental Kuznets curve (EKC) hypothesis: A bibliometric review of the last three decades. **Energy & Environment**, v. 36, n. 1, p. 93–131, fev. 2025.

LEE, Chien-Chiang; CHEN, Mei-Ping; WU, Wenmin. The criticality of tourism development, economic complexity, and country security on ecological footprint. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 29, n. 24, p. 37004–37040, maio 2022.

LEE, Dong-hyun; CHOI, Hyun-seok. The Transition of South Korea's Economic Growth Drivers — From Labor-Intensive to Knowledge-Intensive Industries. **Law and Economy**, v. 3, n. 6, p. 9–22, jun. 2024.

LEITÃO, Nuno Carlos; BALSALOBRE-LORENTE, Daniel; CANTOS-CANTOS, José María. The Impact of Renewable Energy and Economic Complexity on Carbon Emissions in BRICS Countries under the EKC Scheme. **Energies**, v. 14, n. 16, p. 4908, 11 ago. 2021.

LI, Changlin *et al.* Green production and green technology for sustainability: The mediating role of waste reduction and energy use. **Heliyon**, v. 9, n. 12, p. e22496, dez. 2023.

LI, Qiao *et al.* Does improvement of industrial land use efficiency reduce PM2.5 pollution? Evidence from a spatiotemporal analysis of China. **Ecological Indicators**, v. 132, p. 108333, dez. 2021.

LIU, Hongbo *et al.* Export Diversification and Ecological Footprint: A Comparative Study on EKC Theory among Korea, Japan, and China. **Sustainability**, v. 10, n. 10, p. 3657, 12 out. 2018.

LIU, Hongbo; KIM, Hanho; CHOE, Justin. Export diversification, CO2 emissions and EKC: panel data analysis of 125 countries. **Asia-Pacific Journal of Regional Science**, v. 3, n. 2, p. 361–393, jun. 2019.

LIU, Xinglin; ZHOU, Jing. Analysis of the Kuznets curve relationship between economic development and ecological environment in Aba Prefecture. **PLOS ONE**, v. 20, n. 3, p. e0319929, 17 mar. 2025.

MACDONALD, Phil *et al.* **The UK's coal to clean journey**. [S.l.]: Ember, 24 mar. 2023. Disponível em: <<https://ember-energy.org/latest-insights/the-uks-coal-to-clean-journey/>>. Acesso em: 10 ago. 2025.

MACQUEEN, J. Multivariate observations. *In*: : 281–297. PROCEEDINGS OF THE 5TH BERKELEY SYMPOSIUM ON MATHEMATICAL STATISTICS AND PROBABILITY. **Anais...** Oakland, CA, USA: University of California Press, 1967.

MAJEED, Muhammad Tariq *et al.* Economic complexities and environmental degradation: evidence from OECD countries. **Environment, Development and Sustainability**, v. 24, n. 4, p. 5846–5866, abr. 2022.

MANGA, Muge; CENGIZ, Orhan; DESTEK, Mehmet Akif. Is export quality a viable option for sustainable development paths of Asian countries? **Environmental Science and Pollution Research**, v. 30, n. 17, p. 50022–50045, 14 fev. 2023.

MANIA, Elodie. Export Diversification and CO₂ Emissions: An Augmented Environmental Kuznets Curve. **Journal of International Development**, v. 32, n. 2, p. 168–185, mar. 2020.

MEALY, Penny; TEYTELBOYM, Alexander. Economic complexity and the green economy. **Research Policy**, v. 51, n. 8, p. 103948, out. 2022.

MEHRJO, Amir *et al.* Economic complexity, ICT, biomass energy consumption, and environmental degradation: evidence from Iran. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 29, n. 46, p. 69888–69902, out. 2022.

MOUTINHO, Victor; MADALENO, Mara. Does economic sectorial diversification affect the relationship between carbon emissions, economic growth, energy consumption, coal and gas consumption? Evidence from OPEC countries using panel cointegration analysis. **Energy Reports**, v. 8, p. 23–28, jun. 2022.

MURSHED, Muntasir; DAO, Nhung Thi Tuyet. Revisiting the CO2 emission-induced EKC hypothesis in South Asia: the role of Export Quality Improvement. **GeoJournal**, v. 87, n. 2, p. 535–563, abr. 2022.

NATHANIEL, Solomon Prince; EKEOCHA, Davidmac Olisa; NWULU, Nnamdi. Quantile estimation of ecological footprint and economic complexity in emerging economies: The moderating role of increasing energy consumption. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 29, n. 22, p. 33856–33871, maio 2022.

NAVEED, Amjad *et al.* What have we learned from Environmental Kuznets Curve hypothesis? A citation-based systematic literature review and content analysis. **Energy Strategy Reviews**, v. 44, p. 100946, nov. 2022.

NEAGU, Olimpia. The Link between Economic Complexity and Carbon Emissions in the European Union Countries: A Model Based on the Environmental Kuznets Curve (EKC) Approach. **Sustainability**, v. 11, n. 17, p. 4753, 30 ago. 2019.

NG, Tuan-Hock *et al.* Sustainability in Asia: The Roles of Financial Development in Environmental, Social and Governance (ESG) Performance. **Social Indicators Research**, v. 150, n. 1, p. 17–44, jul. 2020.

NI, Mengying; LIU, Zimin; ZHANG, Zhuang. Greening through economic complexity: New evidence from Chinese cities. **Economic Analysis and Policy**, v. 85, p. 2063–2090, mar. 2025.

NUMAN, Umar *et al.* Revisiting the N-shaped environmental Kuznets curve for economic complexity and ecological footprint. **Journal of Cleaner Production**, v. 365, p. 132642, set. 2022.

OBSERVATORY OF ECONOMIC COMPLEXITY (OEC). *The Observatory of Economic Complexity*. Cambridge, MA: MIT, 2024. Disponível em: <https://oec.world/>. Acesso em: 30 mar. 2026.

ODUGBESAN, Jamiu Adetola; SUNDAY, Tomiwa Adebayo; OLOWU, Gbolahan. Asymmetric effect of financial development and remittance on economic growth in MINT economies: an application of panel NARDL. **Future Business Journal**, v. 7, n. 1, p. 39, dez. 2021.

OTENG-ABAYIE, Eric Fosu; MENSAH, Gideon; DUODU, Emmanuel. The role of environmental regulatory quality in the relationship between natural resources and environmental sustainability in sub-Saharan Africa. **Heliyon**, v. 8, n. 12, p. e12436, dez. 2022.

ÖZOKCU, Selin; ÖZDEMİR, Özlem. Economic growth, energy, and environmental Kuznets curve. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 72, p. 639–647, maio 2017.

PADHAN, Hemachandra *et al.* Examining the dynamic synthesis between environmental quality, economic globalization, and economic complexity in OECD countries. **Environment, Development and Sustainability**, v. 27, n. 2, p. 3777–3795, 1 nov. 2023.

PANAÏOTOU, Todor. **Empirical tests and policy analysis of environmental degradation at different stages of economic development**. Geneva: [S.n.].

PASCO, Lorena Olemar; BENDEZU, Hugo Romero. PUBLIC POLICIES AND THEIR IMPACT ON ECONOMIC DEVELOPMENT: A SYSTEMATIC REVIEW. **International Journal of Professional Business Review**, v. 9, n. 11, p. e05068, 16 nov. 2024.

PATA, Ugur Korkut. Renewable and non-renewable energy consumption, economic complexity, CO2 emissions, and ecological footprint in the USA: testing the EKC hypothesis with a structural break. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 28, n. 1, p. 846–861, jan. 2021.

PATA, Ugur Korkut; HIZARCI, Atike Elanur. Investigating the environmental Kuznets curve in the five most complex countries: Insights from a modified ecological footprint model. **Energy & Environment**, v. 34, n. 8, p. 2990–3019, dez. 2023.

- PATA, Uk *et al.* Revisiting the EKC Hypothesis With Export Diversification and Ecological Footprint Pressure Index for India: A RALS-Fourier Cointegration Test. **Frontiers in Environmental Science**, v. 10, p. 886515, 16 maio 2022.
- PESARAN, M. Hashem. General diagnostic tests for cross-sectional dependence in panels. **Empirical Economics**, v. 60, n. 1, p. 13–50, jan. 2021.
- PHILLIPS, Peter C. B. Fully Modified Least Squares and Vector Autoregression. **Econometrica**, v. 63, n. 5, p. 1023, set. 1995.
- POLAT, Buğra; ÇİL, Nilgün. Investigating the environmental Kuznets curve modified with HDI: evidence from a panel of eco-innovative countries. **Environment, Development and Sustainability**, v. 27, n. 7, p. 16655–16682, 28 fev. 2024.
- QIAN, Chen; MADNI, Ghulam Rasool. Encirclement of Natural Resources, Green Investment, and Economic Complexity for Mitigation of Ecological Footprints in BRI Countries. **Sustainability**, v. 14, n. 22, p. 15269, 17 nov. 2022.
- RAHEEM, Ibrahim D.; TIWARI, Aviral Kumar; BALSALOBRE-LORENTE, Daniel. The role of ICT and financial development in CO2 emissions and economic growth. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 27, n. 2, p. 1912–1922, jan. 2020.
- RAHMAN, Mohammad Mafizur; ALAM, Khosrul; VELAYUTHAM, Eswaran. Reduction of CO2 emissions: The role of renewable energy, technological innovation and export quality. **Energy Reports**, v. 8, p. 2793–2805, nov. 2022.
- ROCKSTRÖM, Johan *et al.* A safe operating space for humanity. **Nature**, v. 461, n. 7263, p. 472–475, 24 set. 2009.
- SABOORI, Behnaz; SULAIMAN, Jamalludin. Environmental degradation, economic growth and energy consumption: Evidence of the environmental Kuznets curve in Malaysia. **Energy Policy**, v. 60, p. 892–905, set. 2013.
- SARAFIDIS, Vasilis; WANSBEEK, Tom. Cross-Sectional Dependence in Panel Data Analysis. **Econometric Reviews**, v. 31, n. 5, p. 483–531, set. 2012.
- SATROVIC, Elma; ADEDOYIN, Festus Fatai. An empirical assessment of electricity consumption and environmental degradation in the presence of economic complexities. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 29, n. 52, p. 78330–78344, nov. 2022.
- SAUD, Shah *et al.* Articulating natural resource abundance, economic complexity, education and environmental sustainability in MENA countries: Evidence from advanced panel estimation. **Resources Policy**, v. 80, p. 103261, jan. 2023.
- SHARMA, Vinod Kumar *et al.* A Comprehensive Review of Green Energy Technologies: Towards Sustainable Clean Energy Transition and Global Net-Zero Carbon Emissions. **Processes**, v. 13, n. 1, p. 69, 31 dez. 2024.
- STERN, David I. The Rise and Fall of the Environmental Kuznets Curve. **World Development**, v. 32, n. 8, p. 1419–1439, ago. 2004.

STERN, David I. The environmental Kuznets curve after 25 years. **Journal of Bioeconomics**, v. 19, n. 1, p. 7–28, abr. 2017.

STOJKOSKI, Viktor; KOCH, Philipp; HIDALGO, César A. Multidimensional Economic Complexity and Inclusive Green Growth. 2022.

TANG, Chor Foon; ABOSEDRA, Salah; NAGHAVI, Navaz. Does the quality of institutions and education strengthen the quality of the environment? Evidence from a global perspective. **Energy**, v. 218, p. 119303, mar. 2021.

TEIXEIRA, Natália; RODRIGUES, Rosa; RODRIGUES, António. Economic growth and environmental sustainability in more and less sustainable countries. **Discover Sustainability**, v. 6, n. 1, p. 618, 9 jul. 2025.

TENAW, Dagmawe; BEYENE, Abebe D. Environmental sustainability and economic development in sub-Saharan Africa: A modified EKC hypothesis. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 143, p. 110897, jun. 2021.

TEODORESCU, Ana Maria. Sustainable development, a multidimensional concept. **Annals of the „Constantin Brâncuși” University of Târgu Jiu, Economy Series**, v. Special, p. 82–86, 2015.

TORRAS, Mariano; BOYCE, James K. Income, inequality, and pollution: a reassessment of the environmental Kuznets Curve. **Ecological Economics**, v. 25, n. 2, p. 147–160, maio 1998.

TOUMI, Said. Unveiling impact of financial development, renewable energy, and technological innovation on ecological footprint in major remittance-receiving economies – A PQARDL approach. **International Journal of Renewable Energy Development**, v. 14, n. 1, p. 180–199, 1 jan. 2025.

TZEREMES, Panayiotis; DOGAN, Eyup; ALAVIJEH, Nooshin Karimi. Analyzing the nexus between energy transition, environment and ICT: A step towards COP26 targets. **Journal of Environmental Management**, v. 326, p. 116598, jan. 2023.

UDEAGHA, Maxwell Chukwudi; MUCHAPONDWA, Edwin. Investigating the moderating role of economic policy uncertainty in environmental Kuznets curve for South Africa: Evidence from the novel dynamic ARDL simulations approach. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 29, n. 51, p. 77199–77237, nov. 2022.

UL-HAQ, Jabbar *et al.* How diversification of products impact emissions in China: a provincial perspective. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 30, n. 59, p. 124215–124231, 24 nov. 2023.

UNITED NATIONS. **Transforming our world: The 2030 Agenda for Sustainable Development**. [S.l.]: United Nations, 25 set. 2015a. Disponível em: <<https://sdgs.un.org/2030agenda>>. Acesso em: 8 ago. 2025.

UNITED NATIONS. Paris Agreement. Sponsors: __:n2705. 12 dez. 2015 b.

USMAN, Muhammad; HAMMAR, Nesrine. Dynamic relationship between technological innovations, financial development, renewable energy, and ecological footprint: fresh insights

based on the STIRPAT model for Asia Pacific Economic Cooperation countries.

Environmental Science and Pollution Research, v. 28, n. 12, p. 15519–15536, mar. 2021.

VIGNERON, C. *et al.* [Study of the osmotic behaviour of human platelets]. **Biomedicine / [publiee Pour l'A.A.I.C.I.G.]**, v. 23, n. 6, p. 210–213, 30 jun. 1975.

VU, Trung V. Does institutional quality foster economic complexity? The fundamental drivers of productive capabilities. **Empirical Economics**, v. 63, n. 3, p. 1571–1604, set. 2022.

WANG, Qiang; LI, Yuanfan; LI, Rongrong. Rethinking the environmental Kuznets curve hypothesis across 214 countries: the impacts of 12 economic, institutional, technological, resource, and social factors. **Humanities and Social Sciences Communications**, v. 11, n. 1, p. 292, 21 fev. 2024.

WANG, Qing; XIAO, Kefeng; LU, Zhou. Does Economic Policy Uncertainty Affect CO2 Emissions? Empirical Evidence from the United States. **Sustainability**, v. 12, n. 21, p. 9108, 2 nov. 2020.

WEILI, Liu *et al.* The impact of information and communication technology, financial development, and energy consumption on carbon dioxide emission: evidence from the Belt and Road countries. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 29, n. 19, p. 27703–27718, abr. 2022.

WOOLDRIDGE, Jeffrey M. **Econometric analysis of cross section and panel data**. Cambridge, Mass: MIT Press, 2002.

XAISONGKHAM, Sorphasith; LIU, Xia. Institutional quality, employment, FDI and environmental degradation in developing countries: evidence from the balanced panel GMM estimator. **International Journal of Emerging Markets**, v. 19, n. 7, p. 1920–1939, 25 jun. 2024.

YILANCI, Veli; PATA, Uğur Korkut. Investigating the EKC hypothesis for China: the role of economic complexity on ecological footprint. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 27, n. 26, p. 32683–32694, set. 2020a.

YILANCI, Veli; PATA, Uğur Korkut. Investigating the EKC hypothesis for China: the role of economic complexity on ecological footprint. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 27, n. 26, p. 32683–32694, set. 2020b.

YU, Jiangling *et al.* Estimating the Effects of Economic Complexity and Technological Innovations on CO2 Emissions: Policy Instruments for N-11 Countries. **Sustainability**, v. 14, n. 24, p. 16856, 15 dez. 2022.

YUAN, Ruixi *et al.* Does the Quality of Institutions Modify the Economic Complexity-Environmental Degradation? Evidence from a World Sample. **Polish Journal of Environmental Studies**, 13 fev. 2025.

YÜLEK, Murat A. (ORG.). **Industrial Policy and Sustainable Growth**. Singapore: Springer Singapore, 2018.

YUXIANG, Karl; CHEN, Zhongchang. Financial development and environmental performance: evidence from China. **Environment and Development Economics**, v. 16, n. 1, p. 93–111, fev. 2011.

ZHANG, Yue-Jun. The impact of financial development on carbon emissions: An empirical analysis in China. **Energy Policy**, v. 39, n. 4, p. 2197–2203, abr. 2011.

ZHENG, Xiaoqi *et al.* Drivers of change in China's energy-related CO₂ emissions. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 117, n. 1, p. 29–36, 7 jan. 2020.

ZOU, Bo; PUNJWANI, Ali. Unraveling the Dynamics of Economic Complexity, Clean Energy, Globalization, and Natural Resource Use for Sustainable Development: Insights from “Next 11” Countries. **Sustainability**, v. 17, n. 4, p. 1717, 19 fev. 2025.

APÊNDICE A – Lista completa dos 104 países da amostra

Índice	País
1	Albania
2	Algeria
3	Angola
4	Argentina
5	Australia
6	Austria
7	Bahrain
8	Bangladesh
9	Belgium
10	Benin
11	Bolivia (Plurinational State of)
12	Brazil
13	Bulgaria
14	Burkina Faso
15	Cameroon
16	Canada
17	Chad
18	Chile
19	China
20	Colombia
21	Democratic Republic of the Congo
22	Congo
23	Costa Rica
24	Côte d’Ivoire
25	Denmark
26	Dominican Republic
27	Ecuador
28	Egypt
29	El Salvador
30	Equatorial Guinea
31	Ethiopia
32	Finland
33	France

34	Gabon
35	Germany
36	Ghana
37	Greece
38	Guatemala
39	Guinea
40	Haiti
41	Honduras
42	China, Hong Kong Special Administrative Region
43	Hungary
44	India
45	Indonesia
46	Iran (Islamic Republic of)
47	Ireland
48	Israel
49	Italy
50	Japan
51	Jordan
52	Kenya
53	Republic of Korea
54	Kuwait
55	Lebanon
56	Libya
57	Madagascar
58	Malaysia
59	Mali
60	Mauritania
61	Mexico
62	Mongolia
63	Morocco
64	Mozambique
65	Nepal
66	Netherlands
67	New Zealand
68	Nicaragua

69	Niger
70	Norway
71	Oman
72	Pakistan
73	Panama
74	Paraguay
75	Peru
76	Philippines
77	Poland
78	Portugal
79	Qatar
80	Romania
81	Russian Federation
82	Rwanda
83	Saudi Arabia
84	Senegal
85	Sierra Leone
86	Singapore
87	South Africa
88	Spain
89	Sri Lanka
90	Sweden
91	Switzerland
92	Syrian Arab Republic
93	United Republic of Tanzania
94	Thailand
95	Togo
96	Tunisia
97	Türkiye
98	Uganda
99	United Arab Emirates
100	United Kingdom of Great Britain and Northern Ireland
101	United States of America
102	Uruguay

103	Viet Nam
104	Zambia

Fonte: Elaborado pelo autor

APÊNDICE B – Lista de países por cluster

Cluster 1: Economias Avançadas e Complexas

Índice	País
1	Australia
2	Austria
3	Belgium
4	Canada
5	China, Hong Kong Special Administrative Region
6	Denmark
7	Finland
8	France
9	Germany
10	Ireland
11	Italy
12	Japan
13	Netherlands
14	New Zealand
15	Norway
16	Qatar
17	Republic of Korea
18	Singapore
19	Spain
20	Sweden
21	Switzerland
22	United Arab Emirates
23	United Kingdom of Great Britain and Northern Ireland
24	United States of America

Fonte: Elaborado pelo autor

Cluster 2: Economias Intermediárias

Índice	País
1	Argentina
2	Bahrain
3	Brazil
4	Bulgaria
5	Chile
6	China
7	Colombia
8	Costa Rica
9	Greece
10	Hungary
11	India
12	Indonesia
13	Israel
14	Jordan
15	Kuwait
16	Malaysia
17	Mexico
18	Oman
19	Panama
20	Peru
21	Poland
22	Portugal
23	Romania
24	Russian Federation
25	Saudi Arabia
26	South Africa
27	Thailand
28	Türkiye
29	Uruguay

Fonte: Elaborado pelo autor

Cluster 3: Economias de Baixa Complexidade e Capacidade Estrutural

Índice	País
1	Albania
2	Algeria
3	Angola
4	Bangladesh
5	Benin
6	Bolivia (Plurinational State of)
7	Burkina Faso
8	Cameroon
9	Chad
10	Congo
11	Côte d'Ivoire
12	Democratic Republic of the Congo
13	Dominican Republic
14	Ecuador
15	Egypt
16	El Salvador
17	Equatorial Guinea
18	Ethiopia
19	Gabon
20	Ghana
21	Guatemala
22	Guinea
23	Haiti
24	Honduras
25	Iran (Islamic Republic of)
26	Kenya
27	Lebanon
28	Libya
29	Madagascar
30	Mali
31	Mauritania

32	Mongolia
33	Morocco
34	Mozambique
35	Nepal
36	Nicaragua
37	Niger
38	Pakistan
39	Paraguay
40	Philippines
41	Rwanda
42	Senegal
43	Sierra Leone
44	Sri Lanka
45	Syrian Arab Republic
46	Togo
47	Tunisia
48	Uganda
49	United Republic of Tanzania
50	Viet Nam
51	Zambia

Fonte: Elaborado pelo autor