



De 11 a 14 - NOVEMBRO DE 2024

**Inteligência Artificial
na Gestão de Operações:**
Limitações e possibilidades



COMPLEXIDADE ECONÔMICA, DESEMPENHO LOGÍSTICO E EMISSÕES DE CO₂: PROPOSTA DE UM ÍNDICE DE EFICIÊNCIA LOGÍSTICA VERDE

DANILO MARQUES DE LIMA – danilo.m.lima@unesp.br
UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA - UNESP

LEANDRO MOREIRA PINTO – leandro.moreira@unesp.br
UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA - UNESP

LUANA BEATRIZ MARTINS VALERO VIANA – lb.viana@unesp.br
UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA - UNESP

NAYRA VASIULIS FERREIRA RODRIGUES – nayra.rodrigues@unesp.br
UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA – UNESP

DIOGO FERRAZ – diogoferraz@alumni.usp.br
UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO (UFOP)

ÁREA: 9. ENGENHARIA DA SUSTENTABILIDADE
SUBÁREA: 9.7- DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL

RESUMO: A RÁPIDA EVOLUÇÃO TECNOLÓGICA DESPERTA A REFLEXÃO SOBRE QUAIS OS PAÍSES MAIS EFICIENTES EM LOGÍSTICA VERDE E QUAL O IMPACTO DA COMPLEXIDADE ECONÔMICA NO DESEMPENHO LOGÍSTICO DESTES PAÍSES. PARA RESPONDER A ESTA PERGUNTA, ESTE ESTUDO UTILIZOU UMA AMOSTRA DE 118 PAÍSES, PARA MENSURAR O INDICADOR DE EFICIÊNCIA LOGÍSTICA VERDE (IELV) POR MEIO DA ANÁLISE ENVOLTÓRIA DE DADOS (DEA). ADEMAIS, A ECONOMETRIA FOI UTILIZADA PARA ANALISAR OS DETERMINANTES DA LOGÍSTICA VERDE NO MUNDO, NOS PAÍSES DESENVOLVIDOS E EM DESENVOLVIMENTO. O IELV REVELOU QUE, NO MUNDO, O CONGO FOI O PAÍS MAIS EFICIENTE, SEGUIDO POR RUANDA E REPÚBLICA CENTRO-AFRICANA. DENTRE OS PAÍSES DESENVOLVIDOS, O SINGAPURA FOI EFICIENTE, SEGUIDO PELO SUÉCIA E HOLANDA. DENTRE OS PAÍSES EM DESENVOLVIMENTO, REPÚBLICA DEMOCRÁTICA DO CONGO FOI O PAÍS MAIS EFICIENTE, SEGUIDO PELO RUANDA E REPÚBLICA CENTRO-AFRICANA. A ANÁLISE ECONOMETRICA REVELOU QUE A COMPLEXIDADE ECONÔMICA IMPACTA POSITIVAMENTE A LOGÍSTICA VERDE NOS PAÍSES ANALISADOS. PORTANTO, OS FORMULADORES DE POLÍTICAS PÚBLICAS DEVEM CONSIDERAR A SOFISTICAÇÃO DA ESTRUTURA PRODUTIVA PARA PROMOVER UMA LOGÍSTICA SUSTENTÁVEL NO MUNDO.

PALAVRAS-CHAVES: COMPLEXIDADE ECONÔMICA; EFICIÊNCIA LOGÍSTICA VERDE; ANÁLISE ENVOLTÓRIA DE DADOS; EMISSÕES DE CO₂.

1. INTRODUÇÃO

Países desenvolvidos e em desenvolvimento enfrentam o desafio de promover crescimento econômico e desenvolvimento sustentável (Ferraz et al., 2021). Dentre os principais fatores que influenciam o desenvolvimento econômico estão a estrutura produtiva (Sadeghi *et al.*, 2020) e a infraestrutura logística (Li; Lin, 2017). A complexidade econômica analisa a sofisticação da estrutura produtiva dos países, a fim de promover crescimento econômico com melhor qualidade. Este conceito leva em consideração a diversidade econômica, a sofisticação produtiva e o desenvolvimento de diferentes setores produtivos (Hidalgo; Hausmann, 2009). Este indicador apresenta uma nova perspectiva para compreender a relação entre a estrutura econômica e a eficiência logística, principalmente em um cenário que requer práticas sustentáveis (Olyanga *et al.*, 2022).

A investigação acerca da correlação entre complexidade econômica e desempenho logístico e ambiental é um tema recente. Pesquisas apontam que a relação entre a complexidade econômica e as emissões de carbono segue uma Curva Ambiental de Kuznets (Ye *et al.*, 2023). A sofisticação econômica está associada a maiores investimentos em inovação e tecnologia, fundamentais para a eficácia logística e para a redução de emissões de carbono (Ahmad; Satrovic, 2023). Apesar dos avanços, as análises que diretamente ligam a complexidade econômica ao desempenho climático ainda são insuficientes, ressaltando a necessidade de pesquisas mais detalhadas nessa área. Embora a tecnologia funcione como um facilitador para otimizar processos e reduzir custos (Garrido; Muniz Jr.; Ribeiro, 2024), os efeitos podem variar dependendo do contexto e da estratégia de implementação. Compreender essa relação pode orientar a formulação de políticas públicas e estratégias empresariais que promovam investimentos em inovação e tecnologia, essenciais para a eficiência logística e a redução de emissões (Ahmad; Satrovic, 2023; Mariano *et al.*, 2017).

Contudo, a literatura Internacional carece de um indicador que demonstre quais os países mais eficientes em termos de logística verde. Mais do que isto, a literatura internacional não mapeou os determinantes da logística verde no mundo, o que demonstra a necessidade de responder qual o impacto da complexidade econômica no desempenho logístico verde dos países? Por este motivo, o objetivo deste artigo é mensurar a eficiência logística verde de países desenvolvidos e em desenvolvimento, além de quantificar o impacto da complexidade econômica para este fenômeno. Para cumprir este objetivo, este estudo utilizou a Análise Envoltória de Dados (DEA) para avaliar a eficiência logística verde. Por meio do modelo DEA foi possível apresentar o Indicador de Eficiência de Logística Verde (IELV), que

posteriormente foi analisado por meio da econometria.

Frente ao exposto, este artigo contribui de diversas formas com a literatura de complexidade econômica e logística verde. Primeiro, este artigo contribui teoricamente por associar as áreas de complexidade econômica e logística, que são relevantes para o desenvolvimento econômico, mas têm sido negligenciadas conjuntamente. Segundo, este artigo contribui metodologicamente por apresentar um novo indicador de logística verde. Terceiro, este trabalho contribui para a formulação de políticas públicas, pois revela o ranking de países desenvolvidos e em desenvolvimento mais eficientes em logística verde. Por fim, os resultados econométricos são direcionadores relevantes para as autoridades públicas, a fim de promover uma logística sustentável no mundo.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Emissões de CO₂

O crescimento econômico é necessário para diminuir a pobreza, melhorar o padrão de vida e estimular o bem-estar humano (Peng *et al.*, 2022). No entanto, a queima de combustíveis fósseis, como carvão, petróleo e gás natural, em atividades industriais, transporte e geração de energia, libera grandes quantidades de CO₂ na atmosfera. Assim, dentre as externalidades negativas do crescimento econômico está a emissão de CO₂, um dos principais contribuintes da aceleração do aquecimento global. As emissões de CO₂ global aumentaram em mais de 50% desde o início da revolução industrial (Peng *et al.*, 2022). De acordo com o Banco Mundial (2020) as emissões de CO₂ equivalente no mundo em 2020 foi de 46120921 kt.

A mudança para uma economia de baixo carbono, é urgente e desafiadora, mas apresenta grandes oportunidades para a inovação e o crescimento econômico sustentável. O transporte de bens constitui uma parcela substancial e em expansão das emissões de gases do efeito estufa (Mariano *et al.*, 2017). Os principais Operadores Logísticos mundiais como a DHL, FedEx, UPS e TNT, desenvolveram e implantaram iniciativas ambientais que podem impulsionar a adoção de práticas logísticas sustentáveis, alcançando não apenas os operadores em países desenvolvidos, mas também os países em desenvolvimento (Mariano *et al.*, 2017). Por exemplo, o programa *GoGreen Logistics Solutions* da DHL é uma iniciativa sustentável e inovadora, com o objetivo de reduzir as emissões de carbono e poluição por meio de várias técnicas (Ludin *et al.*, 2024). A meta é atingir uma redução de 50% nas emissões até 2025 e alcançar zero emissões líquidas de carbono até 2050 para todas as atividades de transporte (Deutsche Post DHL Group, 2017). Além disso, a DHL pratica envios domésticos neutros em termos climáticos na Alemanha como padrão, destacando-se pela criação de scooters elétricos

para entregas, com cerca de 10.000 desses veículos já em operação (Ludin *et al.*, 2024).

Além do transporte de matérias-primas e a distribuição de mercadorias, as emissões de CO₂ na logística são resultantes de atividades sociais e econômicas, devido ao consumo de combustíveis fósseis e eletricidade por veículos e instalações de armazenamento (Bai *et al.*, 2022). Um estudo conduzido por Wang *et al.* (2020) investigou a relação entre crescimento econômico e emissões de CO₂, comparando países desenvolvidos e em desenvolvimento. Enquanto os países desenvolvidos adotam medidas como energia verde e transporte mais eficiente, os países em desenvolvimento, focados no crescimento econômico, ainda dependem fortemente de formas de transporte intensivas em energia, colocando pressão extra sobre as metas de redução de CO₂.

2.2 Índice de Desempenho Logístico - LPI

O Índice de Desempenho Logístico (LPI) quantifica o desempenho logístico dos países, analisando fatores que influenciam sua competitividade global (Bayraktar *et al.*, 2024; Gudavalleti; Singh; Vaidya, 2024). Publicado bianualmente pelo Banco Mundial desde 2007, o LPI de 2023 compilou dados logísticos de 139 países (World Bank, 2023). Ele é baseado em uma pesquisa com especialistas em logística que avaliam seis componentes principais: (1) Alfândega, (2) Infraestrutura, (3) Remessas, (4) Competência Logística, (5) Rastreamento e Rastreabilidade e (6) Pontualidade (World Bank, 2023).

A amostra, selecionada aleatoriamente, é composta por indivíduos com conhecimento significativo em logística internacional (World Bank, 2023). Os participantes atribuem notas de 1 a 5, e a partir do método de Análise de Componentes Principais, é gerado um indicador agregado, o LPI. Essa técnica identifica um componente principal que explica a maior parte da variação nos dados, permitindo a construção de um ranking dos países com base em sua eficiência logística (Rashidi; Cullinane, 2019; World Bank, 2023).

Estudos têm utilizado o LPI na análise macroeconômica para esclarecer os desafios e oportunidades no desempenho logístico dos países. Gani (2017) encontrou uma correlação positiva e significativa entre a qualidade da logística e o volume do comércio internacional, indicando que investimentos em infraestrutura logística podem aumentar exportações e importações. Bayraktar (2024) usou o LPI para examinar como disparidades na infraestrutura de transporte, eficiência aduaneira, qualidade dos serviços logísticos e capacidade de rastreamento impactam o desempenho logístico dos países.

Pesquisas utilizam o LPI para criar indicadores que analisam a relação entre desempenho logístico e sustentabilidade. Mariano *et al.* (2017) desenvolveram o Índice de

Desempenho Logístico de Baixo Carbono (LCLPI), que avalia a eficiência logística considerando a redução das emissões de CO₂. Rashidi e Cullinane (2019) criaram o Índice de Desempenho Logístico Sustentável (SOLP), que prioriza sustentabilidade, abrangendo desempenho econômico, ambiental e social. Embora o LCLPI e o SOLP representem avanços, ainda há oportunidades para integrar o índice de complexidade econômica para uma avaliação mais completa do impacto das tecnologias emergentes na eficiência logística e sustentável.

2.3 Complexidade econômica

Segundo Hidalgo e Hausman (2009) a complexidade econômica descreve o nível de desenvolvimento dos países na relação de inovação e diferenciação de produtos de exportação (maior ou menor qualidade dos produtos). A complexidade econômica, tem emergido como um fator vital na qualidade ambiental na literatura recente, sendo reconhecido que a melhoria da eficiência energética para mitigar os níveis de emissão está de certa forma associada ao avanço da sofisticação tecnológica e à aplicação de tecnologias relacionadas ao meio ambiente (Peng *et al.*, 2024; Dogan *et al.*, 2022).

A complexidade econômica pode ser medida pelo Índice de Complexidade Econômica (ECI). O ECI é um ranking de nações em termos de produtos sofisticados em suas cestas de exportação e, portanto, cobre a dinâmica de produção das nações considerando as capacidades (Ahmad *et al.*, 2021). O Índice de Complexidade Econômica (ECI) incorpora dois conceitos para determinar a sofisticação da estrutura produtiva: diversificação produtiva e ubiquidade (Hidalgo; Hausman, 2009). A diversificação produtiva reflete a variedade de produtos distintos de um país e seu conhecimento incorporado, enquanto a ubiquidade mostra quantos países produzem um bem específico. Países com alta complexidade econômica geralmente possuem diversificação produtiva e produzem bens não ubíquos, permitindo-lhes exportar produtos tecnologicamente avançados e de alto valor agregado (Sadeghi *et al.*, 2020).

A inovação e os produtos tecnológicos reduzem o consumo de energia por meio do uso de fontes alternativas e da criação de produtos ecologicamente corretos, como células fotovoltaicas, turbinas eólicas, carros elétricos, entre outros (Ferraz *et al.*, 2021). Portanto, à medida que o ECI aumenta pode-se esperar que a degradação ambiental diminua, uma vez que com o aumento do ECI, a inovação e o conhecimento contribuem para tecnologias mais limpas.

3. MÉTODO

Este trabalho se classifica na categoria de estudo transversal retrospectivo, visto que não há intervenção do pesquisador. Os dados foram coletados do Banco Mundial e do *Our World in Data*. As informações sobre emissões de CO₂ referem-se aos dados mais recentes do

ano de 2020. Como as emissões de CO₂ serão analisadas de forma per capita, os dados populacionais também são referentes ao ano de 2020. Já os dados de logística são representados pelos índices utilizados no *Logistic Performance Index* (LPI) para o ano de 2023.

Este trabalho adotou o critério de corte proposto por Hartmann *et al.* (2017), a fim de excluir países com população e PIBs pequenos. Dessa forma, países com população menor a 1,5 milhões de pessoas e PIB inferior a 1 bilhão de dólares foram removidos da amostra. A base de dados inicial continha 139 países. No entanto, 20 países foram excluídos pelos seguintes motivos: i) 5 países não possuíam dados essenciais de input ou output; ii) 16 países tinham uma população inferior a 1,5 milhões de pessoas; iii) nenhum país apresentava um PIB inferior a 1 bilhão de dólares. Após as exclusões, a amostra final consistiu em 118 países.

De acordo com Mariano e Rebelatto (2014), os tipos de retornos de escala são fundamentais para distinguir os dois principais modelos de Análise Envoltória de Dados (DEA): Retornos Constantes à Escala (CRS) e Retornos Variáveis à Escala (VRS). O Quadro 1 apresenta um resumo dos modelos DEA.

QUADRO 1 – Principais modelos radiais DEA na forma de multiplicadores

Modelo	Orientado ao <i>Input</i>	Orientado ao <i>Output</i>
CCR	$MAX \sum_{i=1}^m u_i \cdot y_{i0}$ <i>Sujeito a :</i> $\sum_{j=1}^n v_j \cdot x_{j0} = 1$ $\sum_{i=1}^m u_i \cdot y_{ik} - \sum_{j=1}^n v_j \cdot x_{jk} \leq 0, \text{ para } k = 1, 2, \dots, h$	$MIN \sum_{j=1}^n v_j \cdot x_{j0}$ <i>Sujeito a :</i> $\sum_{i=1}^m u_i \cdot y_{i0} = 1$ $\sum_{i=1}^m u_i \cdot y_{ik} - \sum_{j=1}^n v_j \cdot x_{jk} \leq 0, \text{ para } k = 1, 2, \dots, h$
BCC	$MAX \sum_{i=1}^m u_i \cdot y_{i0} + w$ <i>Sujeito a :</i> $\sum_{j=1}^n v_j \cdot x_{j0} = 1$ $\sum_{i=1}^m u_i \cdot y_{ik} - \sum_{j=1}^n v_j \cdot x_{jk} + w \leq 0, \text{ para } k = 1, 2, \dots, h$ <i>w sem restrição de sinal</i>	$MIN \sum_{j=1}^n v_j \cdot x_{j0} - w$ <i>Sujeito a :</i> $\sum_{i=1}^m u_i \cdot y_{i0} = 1$ $\sum_{i=1}^m u_i \cdot y_{ik} - \sum_{j=1}^n v_j \cdot x_{jk} + w \leq 0, \text{ para } k = 1, 2, \dots, h$ <i>w sem restrição de sinal</i>

Fonte: Mariano e Rebelatto (2014, p. 5)

Em que: x_{jk} é a quantidade do *input j* da DMU *k*; y_{ik} é a quantidade do *output i* da DMU *k*; y_{i0} quantidade do *input j* da DMU em análise; x_{j0} quantidade do *output i* da DMU em análise; corresponde ao peso do *input j*; u_i é o peso do *output i*; θ significa a eficiência da DMU em análise; w é a contribuição

da DMU k para a meta da DMU em análise; é a quantidade de *outputs* analisados; é a quantidade de *inputs* analisados e ; é o tipo de retorno de escala.

O modelo VRS pressupõe que a variação nos outputs não é proporcional à variação nos inputs (Mariano *et al.*, 2015). Os modelos radiais focam em minimizar os inputs ou maximizar os outputs de forma independente, considerando que: a) os modelos orientados aos inputs buscam determinar, dado o nível atual de outputs, até quanto os inputs podem ser reduzidos; e b) os modelos orientados aos outputs buscam determinar, dado o nível atual de inputs, até quanto os outputs podem ser aumentados (Cooper *et al.*, 2007).

Este artigo utiliza o modelo DEA-BCC, tendo em vista a diferença no tamanho dos países. No modelo utilizado, a emissão de CO₂ pelo setor de transporte foi utilizada como *input*. Para obter valores per capita, a emissão de CO₂ foi dividida pela população dos países, considerando que países com grande população podem emitir grandes quantidades de CO₂ não necessariamente por serem grandes poluidores, mas devido ao tamanho da população. Como outputs, foram utilizados três indicadores do LPI: (1) Pontuação de infraestrutura, que avalia a qualidade da infraestrutura de comércio e transporte de um país, incluindo portos, ferrovias, rodovias e tecnologia da informação; (2) Pontuação de competência logística, que se refere ao nível geral de competência e qualidade dos principais prestadores de serviços logísticos, como operadores logísticos, transportadoras, distribuidores e despachantes aduaneiros; e (3) Pontuação de pontualidade, que mede a precisão das remessas em alcançarem os destinos dentro do prazo de entrega programado ou esperado. O modelo DEA foi orientado ao output com o objetivo de alcançar a melhor qualidade no setor de transporte minimizando a emissão de CO₂. O resultado do modelo representará a eficiência global dos países em desenvolver um setor de transporte com baixas emissões de CO₂. Ademais, este artigo utilizou a Fronteira Invertida como método de desempate (Leta *et al.*, 2005). A Tabela 1 resume as variáveis para calcular o *Indicador de Eficiência de Logística Verde (IELV)*.

TABELA 1. Proposta do modelo DEA

Objetivo	Inputs	Outputs
Eficiência logística com baixa emissão de CO ₂	1 - Emissões de CO ₂ pelo setor de transporte (per capita)	1 - Pontuação de Infraestrutura 2 - Pontuações de Competência Logística 3 - Pontuação de Pontualidade

Fonte: Elaborado pelos autores

Considerando a disparidade no setor de transportes entre países desenvolvidos e em

desenvolvimento, foram elaborados três modelos de DEA. O modelo 1 abrangeu os 118 países analisados, o modelo 2 foi exclusivo para os 30 países desenvolvidos, e o modelo 3 contemplou os 88 países em desenvolvimento.

Por fim, este trabalho investigará como os principais determinantes do desempenho logístico afetam o IELV. Para isso, empregou-se um modelo de Regressão Linear Múltipla entre o IELV e os principais fatores de qualidade logística, identificados na literatura (Aldakhil *et al.*, 2018; Magazzino *et al.*, 2021). Para mais, este estudo contribui com a literatura ao utilizar o Índice de Complexidade Econômica (ECI) como uma das variáveis explicativas do modelo, com o intuito de verificar como o nível de complexidade econômica pode influenciar a eficiência logística verde nos países. Os dados referentes a ECI foram coletados do *Atlas of Economic Complexity*, disponibilizados pelo *Growth Lab* da Universidade de Harvard, os demais foram obtidos no banco de dados do *World Bank*. O modelo econométrico empregou como variável dependente o IELV e 4 variáveis explanatórias. Assim, o modelo de regressão MQO é definido pela equação:

$$Y_{IELV} = \beta_1 + \beta_2 \ln_PIB + \beta_2 FDI + \beta_2 TD + \beta_2 ECI + u \quad (1)$$

Onde Y_{IELV} representa a variável dependente do modelo, β_1 corresponde ao intercepto da regressão, PIB corresponde ao PIB per capita (em US\$ correntes), FDI corresponde ao influxo de investimento externo direto, TD corresponde a abertura comercial, ECI corresponde ao Índice de Complexidade Econômica e, por fim, u que representa o erro do modelo.

4. RESULTADOS

Esta seção apresenta os resultados da eficiência logística em relação às emissões de CO₂. O Modelo 1 analisou 118 países ao redor do mundo. O Congo foi o país mais eficiente, apresentando um IELV igual a 1. Em segundo lugar, Ruanda demonstrou um IELV de 0,9978. Na terceira posição, a República Centro-Africana obteve um IELV de 0,9937. A Índia, com um IELV de 0,9785, ficou em quarto lugar. As Filipinas ocuparam a quinta posição, com um IELV de 0,9705. Observa-se que os três países mais eficientes em logística verde são africanos, um continente marcado pela pobreza e pela ausência de sistemas modernos de logística. Esse resultado pode ser explicado pelo fato de que esses países têm economias pouco desenvolvidas e, consequentemente, emitem pouco CO₂, ao invés de possuírem sistemas logísticos sofisticados e de baixa emissão de CO₂. O top 10 ainda inclui mais dois países africanos.

Embora não possuam os sistemas logísticos mais avançados, esses países possuem populações grandes e baixo nível de desenvolvimento econômico, o que resulta em uma baixa emissão de CO₂ dividida por uma grande população. Dessa forma, mesmo que a logística desses países seja pouco desenvolvida, a emissão de CO₂ per capita é muito baixa. Como o DEA é baseado na relação entre outputs e inputs, esses países produzem pouca logística, mas com um mínimo de emissão de CO₂ per capita. A Tabela 2 resume os 10 países mais eficientes e os 10 menos eficientes em logística verde no mundo.

TABELA 2: Análise Mundial do IELV

Top 10	Rank	IELV	Bottom 10	Rank	IELV
Congo	1	1	Trinidad e Tobago	109	0.419
Ruanda	2	0.9978	Rússia	110	0.419
República C. Africana	3	0.9937	Arábia Saudita	111	0.396
Índia	4	0.9785	Estados Unidos	112	0.391
Filipinas	5	0.9705	Catar	113	0.391
Mali	6	0.9441	Kuwait	114	0.366
Papua Nova Guiné	7	0.9363	Irã	115	0.352
Guiné Bissau	8	0.9312	Angola	116	0.135
China	9	0.9301	Camarões	117	0.126
Bangladesh	10	0.9132	Líbia	118	0

Fonte: Elaborado pelos autores

O Kuwait ocupou a 114^a posição, com um IELV de 0,3662. Na 115^a posição, o Irã apresentou um IELV de 0,3515. Angola ficou na 116^a posição, com um IELV de 0,1353. Camarões, com um IELV de 0,1263, ficou na 117^a posição. A Líbia ocupou a última posição, com um IELV de 0. É importante lembrar que a eficiência medida pelo DEA é relativa ao grupo de países analisados e foi normalizada de modo que apenas um país alcançou o valor 1 e um país o valor zero. Observa-se que, entre os cinco países menos eficientes, dois são grandes produtores de petróleo. Considerando os dez países menos eficientes, seis são grandes produtores de petróleo. Destaca-se também que os Estados Unidos, apesar de possuírem uma boa infraestrutura logística, estão entre os menos eficientes em logística verde, o que pode ser explicado por serem um dos maiores emissores mundiais de CO₂.

Considerando a disparidade no setor de transportes entre países desenvolvidos e em desenvolvimento, foi elaborado o Modelo 2, que analisou exclusivamente os países desenvolvidos. Na Tabela 3 é possível visualizar o top 10 e o bottom 10 do DEA do modelo 2. Singapura foi o país mais eficiente, apresentando um IELV igual a 1. Em segundo lugar, a Suécia demonstrou um IELV de 0,8885. Na terceira posição, a Holanda obteve um IELV de

0,8571. A Suíça, com um IELV de 0,8539, ficou em quarto lugar. A Finlândia ocupou a quinta posição, com um IELV de 0,8501. A Austrália, por sua vez, ficou na 26ª posição, com um IELV de 0,1849, enquanto os Estados Unidos ocuparam a 27ª posição, com um IELV de 0,1676. A República Tcheca ficou na 28ª posição, com um IELV de 0,0975, e a Eslovênia na 29ª posição, com um IELV de 0,0347. Por fim, a Croácia foi o país desenvolvido menos eficiente em termos de logística verde, com um IELV igual a 0.

TABELA 3: Análise dos Países Desenvolvidos do IELV

Top 10	Rank	IELV	Bottom 10	Rank	IELV
Singapura	1	1	Nova Zelândia	21	0.378
Suécia	2	0.8885	Irlanda	22	0.373
Holanda	3	0.8571	Canadá	23	0.341
Suíça	4	0.8539	Eslováquia	24	0.314
Finlândia	5	0.8501	Lituânia	25	0.284
Espanha	6	0.8458	Austrália	26	0.185
Japão	7	0.833	Estados Unidos	27	0.168
Bélgica	8	0.8207	República Tcheca	28	0.098
Alemanha	9	0.8128	Eslovênia	29	0.035
França	10	0.7903	Croácia	30	0

Fonte: Elaborado pelos autores

No modelo 4, para os países em desenvolvimento, observou-se que os países com melhor desempenho no ranking de eficiência logística são os mesmos que lideraram o ranking global. No entanto, no bottom 10, houve algumas mudanças de posições. Por exemplo, Trinidad e Tobago, que no modelo 1 era o 10º menos eficiente, ocupa a 7ª posição no modelo 2. A Líbia continua sendo o país menos eficiente, mesmo quando a comparação é feita com outros países em desenvolvimento. A Tabela 4 resume os países no ranking entre os top 10 e os bottom 10.

TABELA 4: Análise dos Países em Desenvolvimento do IELV

Top 10	Rank	IELV	Bottom 10	Rank	IELV
República D. do Congo	1	1	Catar	79	0.465
Ruanda	2	0.9976	Argélia	80	0.455
República C. Africana	3	0.9938	Rússia	81	0.45
Índia	4	0.9777	Trinidad e Tobago	82	0.438
Filipinas	5	0.9692	Kuwait	83	0.437
Mali	6	0.9439	Arábia Saudita	84	0.428
Papua Nova Guiné	7	0.9359	Irã	85	0.376
Guiné Bissau	8	0.9311	Angola	86	0.134
China	9	0.9258	Camarões	87	0.125
Bangladesh	10	0.913	Líbia	88	0

Fonte: Elaborado pelos autores

A análise econométrica apresenta três modelos de regressão linear múltipla, a fim de demonstrar os determinantes do IELV no mundo, países em desenvolvimento e países desenvolvidos, respectivamente. Vale destacar que apenas os modelos para o mundo e para os países em desenvolvimento apresentaram significância estatística (teste F). Estes modelos foram capazes de explicar de maneira adequada a variabilidade da variável dependente (IELV). Assim, a discussão a seguir apresentará apenas as implicações e interpretações dos resultados obtidos pelos modelos que analisaram o mundo e os países em desenvolvimento.

A Tabela 5 apresenta os resultados do modelo econométrico mundial. O teste F foi estatisticamente significativo ao nível de 10%, indicando a validade do modelo para a explicação da relação entre as variáveis explanatórias e o IELV. O coeficiente de determinação (R^2) foi de 0,094, isto implica dizer que as variáveis independentes do modelo explicam 9,4% da variabilidade do IELV. Destaca-se que a complexidade econômica (ECI) e o crescimento econômico (PIB) foram importantes preditores do IELV, pois apresentaram significância estatística ao nível de 1%. A complexidade econômica apresentou impacto positivo no IELV. Em outros termos, o aumento de 1% no Economic Complexity Index (ECI) aumenta em 39,5% a eficiência da logística verde dos países. Ademais, o crescimento econômico reduziu a eficiência da logística verde, tendo em vista que o aumento de 1% no PIB diminui em 5,6% o IELV. Este resultado era esperado, pois maior crescimento econômico gera maiores emissões de CO₂, reduzindo a eficiência da logística verde.

TABELA 5: Resultados Econométricos da Análise Mundial

Variável	coeficiente	std err	z	P > z	[0.025	0.975]
Intercepto	1.0469	0.164	6.381	0.000	0.725	1.369
PIB	-0.0560	0.021	-2.721	0.007	-0.096	-0.016
TD	0.0826	0.095	0.869	0.385	-0.104	0.269
FDI	-0.1109	0.085	-1.306	0.192	-0.277	0.529
ECI	0.3069	0.113	2.706	0.007	0.085	0.719
Modelo:	OLS		R-Squared:		0.094	
N. Observações:	97		Estat. F:		0.0597	
Tipo de Cvariança:	HC0		Cond. N.		124	

Fonte: Elaborada pelos autores

A Tabela '6 apresenta os resultados do modelo econométrico dos países em desenvolvimento. O teste F foi estatisticamente significativo ao nível de 5%. O coeficiente de determinação (R^2) foi de 9,0%. Novamente, a complexidade econômica e o crescimento econômico foram importantes preditores da logística verde, pois apresentaram significância

estatística ao nível de 5%. Note que o aumento de 1% no Economic Complexity Index (ECI) aumenta em 23,5% a eficiência da logística verde nos países em desenvolvimento. Este é um resultado importante, pois revela que as autoridades públicas dos países em desenvolvimento devem promover estratégias de sofisticação da estrutura produtiva para tornar a logística mais sustentável. Ademais, o aumento de 1% no PIB promove a redução de 6,6% no IELV.

TABELA 6: Resultados Econométricos para Países em Desenvolvimento

Variável	coeficiente	std err	z	P > z	[0.025	0.975]
Intercepto	11.258	0.203	5.556	0.000	0.729	1.523
PIB	-0.0662	0.027	-2.470	0.014	-0.119	-0.014
TD	0.0137	0.082	-0.167	0.867	-0.174	0.147
FDI	0.0331	0.103	0.322	0.747	-0.168	0.234
ECI	0.2357	0.119	1.972	0.049	0.001	0.470
Modelo:	OLS		R-Squared:		0.09	
N. Observações:	67		Estat. F:		0.0496	
Tipo de Cvariança:	HC0		Cond. N.		96.3	

Fonte: Elaborada pelos autores

As descobertas para a análise mundial e para os países em desenvolvimento são consistentes com os achados de Ye et al. (2023), que sugerem que a complexidade econômica promove soluções mais limpas e ecologicamente eficientes. Adicionalmente, a pesquisa de Khezri, Heshmati e Khodaei (2022) sugere que a dinâmica da eficiência energética e ambiental varia conforme o nível de complexidade econômica de um país, influenciando diretamente o desempenho ambiental e logístico.

Em resumo, os dados revelam que o Indicador de Eficiência de Logística Verde (IELV) diminui à medida que o PIB aumenta, o que pode ser explicado pelo fato de que um aumento no PIB tende a elevar as emissões de CO₂. Em outros termos, economias com crescimento econômico enfrentam desafios maiores para controlar as emissões. Por outro lado, a complexidade econômica contribui significativamente para o IELV. O nível mais elevado de complexidade econômica está associado a avanços tecnológicos e inovações que promovem tecnologias mais eficientes e ecológicas. Dessa forma, países com maior ECI tendem a desenvolver e implementar soluções logísticas que minimizam as emissões de CO₂, melhorando assim o desempenho no IELV. Portanto, estes resultados destacam a relevância da complexidade econômica como um fator determinante do desempenho logístico sustentável nos países, indicando que o ECI pode oferecer um caminho para sustentabilidade e eficiência logística, enquanto o crescimento econômico tende a trazer desafios ambientais para os países.

5. CONCLUSÃO

O objetivo deste artigo foi analisar a eficiência logística verde de diferentes países, mensurando o impacto da complexidade econômica sobre o desempenho logístico verde. A existência de uma relação positiva entre a complexidade econômica e a IELV, bem como a influência negativa do PIB per capita sobre o IELV, permite dizer que o objetivo foi alcançado, preenchendo a lacuna existente na literatura sobre os determinantes da sustentabilidade logística.

Os resultados principais deste estudo destacam que a complexidade econômica desempenha um papel crucial na eficiência das práticas logísticas sustentáveis. Países com maior complexidade econômica são capazes de gerenciar suas cadeias logísticas de maneira mais eficiente, resultando em menores emissões de CO₂. Do ponto de vista teórico, isso sublinha a importância da inovação e da sofisticação tecnológica como impulsionadoras da sustentabilidade logística. Em termos práticos, os achados indicam que políticas que priorizam exclusivamente o crescimento econômico podem aumentar a pegada de carbono, destacando a necessidade de estratégias que integrem crescimento econômico com metas de sustentabilidade ambiental. Além disso, empresas e investidores podem direcionar seus investimentos para setores com alto potencial de complexidade econômica, impulsionando a inovação e a sustentabilidade na logística.

Embora este estudo apresente avanços para a complexidade econômica e logística verde, algumas limitações foram encontradas. Primeiro, há limitação na amostra de países e o período de análise específico. Sugere-se que estudos futuros analisem dados em painel, a fim de aumentar o número de observações nos modelos econométricos e analisar a evolução da eficiência logística verde nos países. Estudos futuros devem analisar outros determinantes da eficiência logística verde, por exemplo, indicadores de governança, cultura e fatores institucionais. Por fim, conclui-se que a sofisticação da estrutura produtiva é um importante determinante para promover uma logística mais verde e sustentável no mundo.

REFERÊNCIAS

AHMAD, Mahmood et al. An environmental impact assessment of economic complexity and energy consumption: does institutional quality make a difference? **Environmental Impact Assessment Review**, v. 89, p. 106603, 2021.

AHMAD, Munir; SATROVIC, Elma. How does monetary policy moderate the influence of economic complexity and technological innovation on environmental sustainability? The role

of green central banking. **International Journal of Finance & Economics**, 2023.

ALDAKHIL, A. M. et al. Determinants of green logistics in BRICS countries: An integrated supply chain model for green business. **Journal of Cleaner Production**, v. 195, p. 861–868, 10 set. 2018.

ALI, Shahid; XIAOHONG, Zhou; HASSAN, Syed Tauseef. The hidden drivers of human development: Assessing its role in shaping BRICS-T's economics complexity, and bioenergy transition. **Renewable Energy**, v. 221, p. 119624, 2024.

BAG, Surajit; GUPTA, Shivam; KUMAR, Sameer. Industry 4.0 adoption and 10R advance manufacturing capabilities for sustainable development. **International journal of production economics**, v. 231, p.107844, 2021.

BAI, Dongling *et al.* Spatio-temporal heterogeneity of logistics Co2 emissions and their influencing factors in China: an analysis based on spatial error model and geographically and temporally weighted regression model. **Environmental Technology & Innovation**, v. 28, p. 102791, 2022.

BANCO MUNDIAL. **Logistics Performance Index 2023**. Washington, D.C.: 2023. 28 p.

BAYRAKTAR, Erkan *et al.* Unveiling the Drivers of Global Logistics Efficiency: Insights from Cross-Country Analysis. **Sustainability**, v. 16, n. 7, p. 2683, 2024.

BURCH, Jan et al. Climate Change Performance 2023. Bonn: Germanwatch, NewClimate Institute and Climate Action Network, 2023.

CAGLAR, Abdullah Emre et al. Determinants of CO2 emissions in the BRICS economies: The role of partnerships investment in energy and economic complexity. **Sustainable Energy Technologies and Assessments**, v. 51, p. 101907, 2022.

DEUTSCHE POST DHL GROUP. **Mission 2050: zero emissions**. 2017. Disponível em: <<https://www.dhl.com/content/dam/dhl/global/core/documents/pdf/dhl-partnerships-gogreen-2017.pdf>>. Acesso em 07 jun. 2024.

DOĞAN, Buhari et al. Are economic complexity and eco-innovation mutually exclusive to control energy demand and environmental quality in E7 and G7 countries?. **Technology in Society**, v. 68, p. 101867, 2022.

FERRAZ, Diogo et al. Linking economic complexity, diversification, and industrial policy with sustainable development: a structured literature review. **Sustainability**, v. 13, n. 3, p. 1265, 2021.

GANI, Azmat. The logistics performance effect in international trade. **The Asian journal of shipping and logistics**, v. 33, n. 4, p. 279-288, 2017.

GARRIDO, Susana; MUNIZ JR, Jorge; RIBEIRO, Vagner Batista. Operations Management, Sustainability & Industry 5.0: A Critical Analysis and Future Agenda. Cleaner Logistics and Supply Chain, p. 100141, 2024.

GUDAVALLETI, Pavan Kumar; SINGH, Sanjeet; VAIDYA, Omkarprasad S. Pure output model-based context-dependent DEA: Tool for analyzing index published by assessing bodies. **Expert Systems with Applications**, v. 244, p. 122843, 2024.

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, 2009.

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, 2022.

LI, Ke; LIN, Boqiang. Economic growth model, structural transformation, and green productivity in China. **Applied Energy**, v. 187, p. 489-500, 2017.

LUDIN, Daniela *et al.* Climate Friendly Transport: A Study on Sustainable Trade Logistics in Multi-Channel Retail based on a Survey of Floristry Retailers in Germany. **Tehnički glasnik**, v. 18, n. 2, p. 273-281, 2024.

MAGAZZINO, C.; ALOLA, A. A.; SCHNEIDER, N. The trilemma of innovation, logistics performance, and environmental quality in 25 topmost logistics countries: A quantile regression evidence. **Journal of Cleaner Production**, v. 322, p. 129050, 1 nov. 2021.

MARIANO, Enzo Barberio *et al.* CO2 emissions and logistics performance: a composite index proposal. **Journal of Cleaner Production**, v. 163, p. 166-178, 2017.

OLYANGA, Anthony Moni *et al.* Export logistics infrastructure and export competitiveness in the East African Community. **Modern Supply Chain Research and Applications**, v. 4, n. 1, p. 39-61, 2022.

PENG, Gao *et al.* Economic growth, technology, and CO2 emissions in BRICS: Investigating the non-linear impacts of economic complexity. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 29, n. 45, p. 68051-68062, 2022.

RASHIDI, Kamran; CULLINANE, Kevin. Evaluating the sustainability of national logistics performance using Data Envelopment Analysis. **Transport Policy**, v. 74, p. 35-46, 2019.

SADEGHI, Pegah *et al.* Economic complexity, human capital, and FDI attraction: A cross country analysis. **International Economics**, v. 164, p. 168-182, 2020.

TRAN, Mai Ngoc. Impact of green logistics on Vietnam's regional trade. **The Asian Journal of Shipping and Logistics**, 2024.

UNITED NATIONS. **Technology and Innovation Report 2023**. Nova York, N. Y.: 2023. 236

WANG, Chao *et al.* Transportation CO2 emission decoupling: An assessment of the Eurasian logistics corridor. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, v. 86, p. 102486, 2020.

WORLD BANK. Logistics Performance Index. Washington: The World Bank, 2023. Disponível em: <https://lpi.worldbank.org/sites/default/files/2023-04/LPI_2023_report_with_layout.pdf>. Acesso em 25 mai. 2024.

YE, Chong *et al.* Can increased economic complexity and reduced carbon emissions of the logistics industry go hand in hand? Evidence from countries along the Belt and Road. **Advances in Climate Change Research**, v. 14, n. 5, p. 789-797, 2023.