

# SUSTENTABILIDADE, CONGESTIONAMENTO E DINÂMICA DA EFICIÊNCIA UNIFICADA DAS NAÇÕES<sup>1</sup>

Gabriel Teixeira Ervilha<sup>2</sup>

Wilson da Cruz Vieira<sup>3</sup>

Elaine Aparecida Fernandes<sup>4</sup>

O objetivo deste trabalho é avaliar a dinâmica da eficiência unificada (produtiva e ambiental) dos países no período de 2006 a 2014, assim como a ocorrência de congestionamentos na produção mundial. Ao analisar a presença de congestionamentos, observa-se que o congestionamento desejável – priorizado em uma investigação que preza pela sustentabilidade – está presente em pequena parte dos 109 países analisados. Por sua vez, a análise temporal indica que pouco foi alterado na dinâmica da eficiência unificada, mesmo diante dos debates sobre mudanças climáticas. Os resultados indicaram que há espaço para ganhos ambientais consistentes, principalmente por meio do desenvolvimento de ecotecnologias.

**Palavras-chave:** congestão; disposição gerencial; disposição natural; índice de Malmquist; sustentabilidade.

## SUSTAINABILITY, CONGESTION AND THE DYNAMICS OF UNIFIED EFFICIENCY IN NATIONS

The objective of this paper is to assess the dynamics of unified efficiency (both productive and environmental) across countries between 2006 and 2014, as well as the occurrence of congestion in global production. The analysis shows that desirable congestion – prioritized in an investigation that emphasizes sustainability – was found in only a small share of the 109 countries examined. Over time, the dynamics of unified efficiency changed very little, even amid the growing debates on climate change. The findings suggest that there remains considerable room for consistent environmental improvements, particularly through the development of eco-technologies.

**Keywords:** congestion; natural disposability; managerial disposability; Malmquist index; sustainability.

**JEL:** C61; Q55; Q56.

## 1 INTRODUÇÃO

O desenvolvimento sustentável exige que as dimensões econômicas, sociais e ambientais devam ser consideradas simultaneamente em todas as esferas e níveis da sociedade, considerando as tecnologias adotadas, os recursos utilizados, as relações entre os diversos agentes e os possíveis *trade-offs* existentes entre as diferentes dimensões.

Apesar de não existir consenso na literatura sobre a direção da relação entre preservação ambiental e crescimento econômico (Palmer, Oates e Portney, 1995;

1. DOI: <http://dx.doi.org/10.38116/ppe55n3art5>.

2. Técnico do Departamento de Economia da Universidade Federal de Viçosa (UFV). *E-mail:* gabriel.ervilha@ufv.br.

3. Professor titular do Departamento de Economia Rural da UFV. *E-mail:* wvieira@ufv.br.

4. Professora titular do Departamento de Economia da UFV. *E-mail:* eafernandes@ufv.br.

Simpson e Bradford, 1996; Porter e Linde, 1995), é fato que tal relação existe e demanda estudos e métodos que consigam relacionar os resultados desejáveis (produção de bens e serviços) e indesejáveis (emissão de gases do efeito estufa, por exemplo) dos processos produtivos globais. Diante disso, este estudo se propõe a responder: quais são os determinantes da eficiência unificada das nações e como se manifesta a ocorrência de congestionamentos produtivos e ambientais no contexto global?

Nessa esfera, Ripple *et al.* (2017) apontam que importantes passos devem ser considerados para a garantia da sustentabilidade, destacando entre eles: i) desenvolver e adotar instrumentos políticos adequados para remediar problemas e fatores de degradação ambientais; ii) adotar maciçamente fontes de energia renováveis; iii) manutenção dos serviços ecossistêmicos da natureza; e iv) conceber e promover novas tecnologias ecológicas que reduzam a emissão de poluentes e o consumo de insumos como água, energia e outras matérias-primas. Assim, há a necessidade de as nações articularem, de forma eficiente, um equilíbrio entre o progresso econômico e a redução dos fatores degradantes ao meio ambiente, mais especificamente das emissões de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) equivalente.

Dessa forma, a presente pesquisa busca analisar as questões técnicas relativas ao processo produtivo internacional, através da eficiência produtiva e ambiental das nações, utilizando-se de métodos não paramétricos de fronteira mais adequados à análise ambiental<sup>5</sup> e ainda pouco difundidos na literatura. Diante disso, considera-se: i) verificar se os países eficientes produtivamente também apresentam ecoeficiência;<sup>6</sup> ii) analisar a ocorrência e o desenvolvimento de ecotecnologias no processo produtivo dos países; e iii) inferir avanços na ecoeficiência das nações por meio da análise temporal.

Os estudos acerca da ecoeficiência dos países e/ou setores econômicos estão presentes na literatura, em diferentes estruturas e para distintos objetos de estudo.<sup>7</sup> Os avanços metodológicos e computacionais na avaliação ambiental, por meio da análise envoltória de dados, foram construídos por pesquisas realizadas nos setores de energia do Japão e dos Estados Unidos (Sueyoshi e Goto, 2009, 2010, 2011a, 2011b). Por sua vez, os conceitos de disposição natural e disposição gerencial foram apresentados por Sueyoshi e Goto (2012a), ao diferenciarem o desempenho público e privado de empresas petrolíferas. A partir desses estudos, desenvolveram-se diversos outros (Sueyoshi e Goto, 2012b, 2012c, 2012d, 2012e, 2015a; Goto, Otsuka e Sueyoshi, 2014; Sueyoshi, Li e Gao, 2018), e expandiram-se as análises para a

---

5. Para um resumo sobre os conceitos de eficiência na área ambiental, consultar Jollands (2006).

6. O conceito de ecoeficiência produtiva surgiu do interesse de buscar uma produção de bens e serviços que atenda ao mercado, causando a menor degradação ambiental possível (Kuosmanen e Kortelainen, 2005).

7. Para revisões detalhadas sobre a literatura que relaciona eficiência e meio ambiente e as aplicações da análise envoltória de dados em meio ambiente, consultar Caiado *et al.* (2017); Mardani *et al.* (2017, 2018); Sueyoshi, Yuan e Goto (2017); Sueyoshi e Goto (2018); Zhou *et al.* (2018).

presença de congestionamento (Sueyoshi e Goto, 2012f, 2016; Sueyoshi e Yuan, 2016a; Sueyoshi e Wang, 2018) e os estudos com análise temporal (Sueyoshi e Goto, 2013a, 2015b; Sueyoshi, Goto e Sugiyama, 2013; Sueyoshi, Goto e Wang, 2017; Sueyoshi e Yuan, 2017, 2018).

Nesse ínterim, observa-se que as pesquisas relacionadas à mensuração da ecoeficiência estão cada vez mais presentes na literatura correlata. Contudo, a análise global da eficiência unificada de países ainda é escassa. Dessa forma, este estudo preenche uma importante lacuna metodológica e empírica ao apresentar importantes contribuições para a literatura ao integrar, pela primeira vez, a análise envoltória de dados (DEA) sob as perspectivas de disposição natural e disposição gerencial com análise global sobre eficiência produtiva e ambiental. Além disso, amplia a literatura existente por meio da análise inédita dos congestionamentos desejáveis e indesejáveis na produção mundial e pelo uso do índice de Malmquist para avaliação temporal da eficiência unificada. Esses elementos fornecem uma nova abordagem para investigar o avanço das ecotecnologias nos processos produtivos e seu impacto sobre a ecoeficiência global.

A relevância aplicada deste trabalho reside na capacidade de fornecer *insights* quantitativos para formuladores de políticas públicas, indicando áreas em que os países podem melhorar sua eficiência produtiva e ambiental simultaneamente. Os achados podem subsidiar a criação de estratégias mais eficazes para o desenvolvimento sustentável e para a mitigação de impactos ambientais negativos, contribuindo para uma tomada de decisão mais informada em nível global e nacional.

Especificamente, pretende-se, através da DEA, investigar a ocorrência de congestionamentos desejáveis e indesejáveis na produção mundial para o ano de 2014 (última base de dados consolidada disponível), bem como analisar a evolução das eficiências ao longo do tempo (2006 a 2014). Particularmente, este estudo dedicará atenção à análise do desempenho do Brasil no contexto da eficiência unificada, visando a identificar sua posição, desafios e oportunidades em relação às demais nações analisadas, oferecendo proposições relevantes para a política ambiental e de desenvolvimento do país.

Os esforços realizados para tratar as relações existentes entre os aspectos institucionais, econômicos, técnicos e inovativos, tanto do ponto de vista teórico quanto empírico, reforçam a relevância da temática e abrem importantes debates com relação ao desenvolvimento sustentável, mais especificamente com a sustentabilidade ambiental. O quantitativo de países (109),<sup>8</sup> a definição dos insumos e produtos, o período de análise, o tratamento dos dados, a construção dos modelos de programação

---

8. O número de países analisados refere-se à disponibilidade de dados na base do Banco Mundial (DataBank). Inconsistências identificadas na base de dados também foram consideradas na seleção da amostra.

matemática em linguagem GAMS<sup>9</sup> e os diferentes cenários metodológicos são, também, pontos de destaque que respaldam a importância e originalidade da pesquisa.

Além desta introdução, o artigo está estruturado em mais quatro seções: na seção 2, são apresentados aspectos teóricos e empíricos da ecoeficiência; em seguida, na seção 3, encontram-se as principais ferramentas metodológicas empregadas na análise, assim como os dados e as variáveis utilizadas. Os resultados e discussão estão na seção 4 e, finalmente, na seção 5, apresentam-se as principais conclusões do trabalho.

## 2 ASPECTOS TEÓRICOS E EMPÍRICOS DA EFICIÊNCIA E ECOEFICIÊNCIA

Nesta seção, são apresentados, inicialmente, os fundamentos teóricos sobre sustentabilidade, ecoeficiência e ecotecnologia, seguidos pela descrição detalhada da metodologia DEA ambiental utilizada para a mensuração da eficiência unificada.

### 2.1 Sustentabilidade, ecoeficiência e ecotecnologias

A crescente preocupação com os limites ambientais do desenvolvimento econômico impulsionou o surgimento de abordagens que buscam compatibilizar crescimento, competitividade e preservação dos recursos naturais. Nesse cenário, a literatura acadêmica tem enfatizado a importância de práticas produtivas sustentáveis, com destaque para conceitos como ecoeficiência,ecoinovação e produtividade verde.

A ecoeficiência, a produtividade verde e a ecoinovação são conceitos inter-relacionados que sustentam tanto os objetivos analíticos quanto as escolhas metodológicas deste estudo, sendo fundamentais para reorientar estratégias empresariais, políticas públicas e marcos regulatórios rumo a modelos mais sustentáveis de produção e consumo. A ecoeficiência atua como indicador central de desempenho ambiental e econômico, refletindo a capacidade de produzir mais com menos recursos e poluir menos (Kuosmanen e Kortelainen, 2005). A produtividade verde amplia essa abordagem ao considerar a inserção de ganhos tecnológicos e inovação no processo produtivo (Mohanty e Deshmukh, 1999). Já a ecoinovação representa o mecanismo por meio do qual esses ganhos são viabilizados, seja pela adoção de novas tecnologias, processos ou práticas institucionais (Hojnik e Ruzzier, 2016). Esses três pilares teóricos justificam a opção por uma modelagem DEA que incorpore simultaneamente múltiplos *inputs* e *outputs*, desejáveis e indesejáveis, sob diferentes disposições ambientais.

A sustentabilidade, compreendida como a capacidade de suprir as necessidades presentes sem comprometer as gerações futuras, vem sendo amplamente discutida na literatura em associação à ecoeficiência e à adoção de ecotecnologias. Estas últimas,

---

9. General Algebraic Modeling System.

também referidas como ecoinovação ou inovação ambiental, englobam práticas, produtos e processos que aliam ganhos econômicos à mitigação de impactos ambientais (Chistov, Aramburu e Carrillo-Hermosilla, 2021; Caiado *et al.*, 2017). A proposta da produtividade verde surge, nesse contexto, como uma resposta integrada à necessidade de compatibilizar crescimento econômico com responsabilidade socioambiental (Fernandes e Freitas, 2014).

A ecoeficiência, segundo a definição do World Business Council for Sustainable Development (WBCSD), consiste em produzir mais com menos recursos e resíduos, ao passo que a ecoinovação configura-se como um mecanismo central para essa transição. Segundo o documento, o termo ecoeficiência foi introduzido em 1991 pelo Conselho Empresarial para o Desenvolvimento Sustentável (Business Council for Sustainable Development – BCSD) e popularizado no livro *Changing Course*, de Stephan Schmidheiny. Desde sua criação, a ecoeficiência se expandiu de um conceito empresarial para uma abordagem política e macroeconômica. Foi adotada por organizações como a Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico (OCDE) e a Comissão Europeia, e passou a ser aplicada em diversos setores e regiões, incluindo países em desenvolvimento (WBCSD, 2000).

No que se refere à ecoinovação, destaca-se a contribuição de Koeller *et al.* (2020), que definiu a ecoinovação como um conceito multifacetado que vai além da tecnologia de fim de tubo, incorporando práticas organizacionais e políticas públicas. A taxonomia de Kemp e Pearson (2007) é útil para classificar essas inovações, que podem ser estratégicas ou passivas, dependendo de sua motivação. A importância de fatores institucionais e do porte das empresas é evidenciada por Miranda, Koeller e Lustosa (2023), que mostraram a influência das regulamentações e da estrutura organizacional sobre a adoção de ecotecnologias.

Porter e Linde (1995) argumentaram que a inovação ambiental, além de mitigar externalidades, pode promover vantagens competitivas. Essa perspectiva é corroborada por M. Santos, E. Santos e Maia (2023), os quais demonstraram, com base em dados da Pesquisa de Inovação (Pintec) e da Pesquisa Industrial Anual (PIA), que inovações ambientais impactam positivamente a produtividade, mesmo em cenários de instabilidade econômica.

A literatura mais recente tem apontado a *Open Eco-Innovation* (OEI) como uma estratégia importante. Definida como o uso intencional de fluxos de conhecimento e recursos, internos e externos, para o desenvolvimento de inovações sustentáveis, a OEI permite superar barreiras financeiras e técnicas, por meio de colaborações com universidades, centros de pesquisa e outras organizações (Chistov, Aramburu e Carrillo-Hermosilla, 2021). Segundo Ghisetti e Pontoni (2015) e Fabrizi, Guarini e Meliciani (2018), a OEI amplia o alcance das inovações sustentáveis, reduz riscos e acelera a transição para economias circulares.

Complementarmente, Janahi, Durugbo e Al-Jayyousi (2021) destacaram cinco linhas temáticas nas estratégias deecoinovação na manufatura: *drivers* e barreiras, capacidades organizacionais, desempenho ambiental, estrutura de governança e redes colaborativas. Os autores propõem um *framework* com oito objetivos estratégicos, entre os quais se destacam a conformidade ambiental, a diferenciação de produtos e a colaboração interorganizacional.

Por fim, estudos como o de Salles *et al.* (2016) apontam que a ecoeficiência no Brasil está associada não apenas à redução de custos, mas também à construção de imagem institucional e à obtenção de vantagens competitivas, evidenciando sua relevância estratégica no planejamento organizacional de longo prazo.

## 2.2 Eficiência produtiva, meio ambiente e análise envoltória de dados

A análise da eficiência produtiva e ambiental tem avançado com o uso de métodos multicritério, como a DEA, especialmente adaptados para incorporar *outputs* indesejáveis. Modelos como os propostos por Farrell (1957) e estendidos por Kuosmanen e Kortelainen (2005) e Cooper *et al.* (2011) permitem avaliar simultaneamente a geração de produtos e a emissão de resíduos, oferecendo uma visão mais completa do desempenho das unidades produtivas.

A fundamentação metodológica adotada neste artigo está ancorada em Sueyoshi e Goto (2012a), que introduzem os conceitos de disposição natural e disposição gerencial na análise de eficiência unificada.<sup>10,11</sup> Tais abordagens oferecem suporte direto à modelagem DEA utilizada neste estudo, pois permitem mensurar simultaneamente *outputs* desejáveis e indesejáveis. A escolha pela aplicação desses modelos decorre da sua capacidade de capturar as diferentes estratégias adotadas pelos países – seja priorizando ganhos operacionais (disposição natural) ou investindo em tecnologias limpas (disposição gerencial) –, alinhando-se, portanto, à literatura recente sobre sustentabilidade e produtividade verde. Essa abordagem é expandida por Sueyoshi e Yuan (2017), que discutem a mensuração da eficiência unificada com base em distâncias radiais.

Além disso, a inclusão da análise de congestionamento (Sueyoshi e Goto, 2016) e da avaliação dinâmica via índice de Malmquist (Sueyoshi e Goto, 2013a) permite entender não apenas os níveis de eficiência dos países, mas também sua trajetória ao longo do tempo, o que é central para o objetivo deste trabalho. Para analisar a presença de congestionamentos e a evolução temporal da eficiência unificada dos países, este trabalho utiliza os conceitos de disposição natural e disposição gerencial, propostos por Sueyoshi e Goto (2012a).

10. Conceitos originalmente definidos como *natural disposability* e *managerial disposability*, respectivamente. Na tradução livre, optou-se por utilizar o termo “disposição” (ato ou efeito de dispor). Contudo, é possível encontrar na literatura em português traduções como: descartabilidade e disponibilidade, ou o uso do próprio termo em inglês.

11. Os conceitos de disposição natural e disposição gerencial apresentam semelhanças com os conceitos de disposição fraca (*weak disposibility*) e disposição forte (*strong disposibility*) – comumente utilizados na análise DEA – em termos de suas perspectivas conceituais e metodológicas. Para detalhes sobre tais relações, consultar Sueyoshi e Goto (2012f). Para outros detalhes sobre os conceitos de disposição fraca e disposição forte, consultar Ray (2004).

Na disposição natural, o desempenho operacional é medido como prioridade e o resultado ambiental, como objetivo secundário. Nessa estratégia, a unidade tomadora de decisão (DMU) tenta diminuir o vetor de insumos (*inputs*) para reduzir o vetor de resultados indesejáveis e, diante da redução no volume de entradas, a DMU tenta aumentar tanto quanto possível o vetor de produtos desejáveis (*outputs*) (Sueyoshi e Goto, 2012a).

Já na disposição gerencial, a prioridade nas medidas de desempenho operacional e ambiental é oposta, indicando uma estratégia na qual o desempenho ambiental dos países é tão importante quanto o seu desempenho operacional. Diferentemente da disposição natural, a DMU amplia o vetor de entradas, mas tenta melhorar seu desempenho unificado utilizando-se de ganhos tecnológicos sustentáveis (Sueyoshi e Goto, 2012a). Assim, o aumento do vetor de insumos gera um aumento no vetor de saídas desejáveis e a diminuição no vetor de resultados indesejáveis, visto um avanço de ecotecnologia.<sup>12</sup>

A literatura sobre DEA aplicada à análise ambiental tem se expandido nos últimos anos, com destaque para os trabalhos de Sueyoshi e Goto (2012a, 2016), que introduziram modelos capazes de incorporar *outputs* indesejáveis e diferentes disposições de orientação (natural e gerencial). Zhou *et al.* (2018) revisaram os avanços metodológicos na área, destacando a importância da DEA como ferramenta para avaliar a ecoeficiência de unidades produtivas e países. A modelagem adotada neste trabalho segue essas diretrizes, permitindo uma análise abrangente que considera os efeitos das tecnologias limpas e das políticas ambientais no desempenho global das nações.

Assim, o uso de modelos DEA voltados à sustentabilidade e fundamentados em disposições ambientais distintas permite uma avaliação abrangente do desempenho das unidades produtivas, ao passo que conceitos como OEI e produtividade verde ampliam o entendimento das estratégias sustentáveis contemporâneas.

### 2.2.1 Modelos DEA aplicados à análise ambiental

Segundo Cooper *et al.* (2011), o congestionamento ocorre quando o produto que é maximamente possível pode ser observado ao reduzir um ou mais insumos sem alterar qualquer outra entrada ou saída. Alternativamente, pode-se dizer que o congestionamento ocorre quando alguns dos produtos que são maximamente possíveis são reduzidos aumentando uma ou mais entradas sem modificar qualquer outro insumo ou produto.<sup>13</sup>

A abordagem DEA, proposta neste trabalho, incorpora uma possível ocorrência de congestionamentos indesejáveis e de congestionamentos desejáveis na

---

12. Outras extensões fundamentais relacionadas aos conceitos de disposição natural e disposição gerencial, referindo-se aos efeitos de escala (retornos e danos), por exemplo, podem ser encontradas em Sueyoshi e Goto (2012c, 2018).

13. Para uma conceituação detalhada sobre congestionamento e sua identificação em modelos DEA tradicionais, consultar Cooper *et al.* (2011).

avaliação ambiental. Tal presença de congestionamento pode provir de um limite de capacidade em parte, ou em todo, do sistema de produção, já tradicionalmente debatido na estrutura DEA convencional, e de uma possível ocorrência de “limite econômico”<sup>14</sup> (Sueyoshi e Goto, 2018). Assim, a análise de congestionamento permite identificar tanto limites de capacidade produtiva como possibilidades de inovação ecotecnológica na redução dos impactos ambientais.

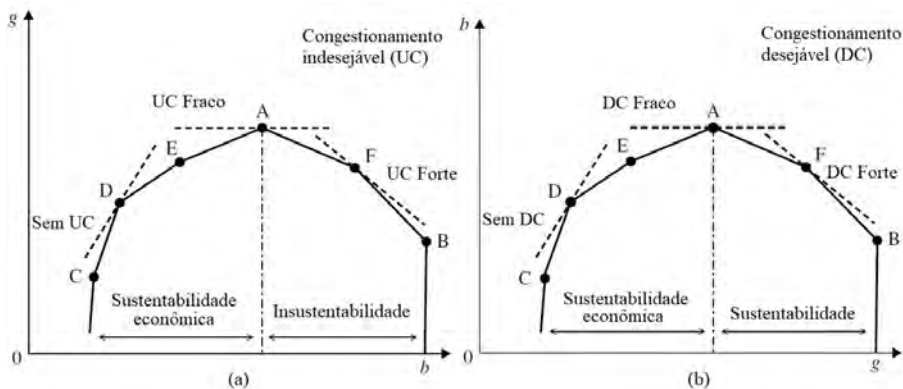
Os conceitos de congestionamento indesejável (UC) e congestionamento desejável (DC) ficam mais compreensíveis a partir do gráfico 1. No gráfico 1A, uma inclinação negativa indica a ocorrência de UC, sendo considerada “UC forte”. A ocorrência implica um caso em que uma DMU aumenta uma quantidade de um insumo ( $x$ ) e tal alteração aumenta o resultado indesejável ( $b$ ), mas diminui o vetor de produto desejável ( $g$ ). Em contraste, uma inclinação positiva implica ausência de congestionamento, sendo assim referido como “sem UC”. Além dos dois casos, há a situação na qual a inclinação da linha é zero, denominado “UC fraco”. A ausência de UC indica “sustentabilidade econômica”, em que um país pode alcançar sucesso econômico, mas sem considerações sobre a questão ambiental; já a presença de UC pode indicar a ocorrência de “insustentabilidade” tanto econômica quanto ambiental.

GRÁFICO 1

**Congestionamentos indesejável e desejável**

1A – Congestionamento indesejável (UC)

1B – Congestionamento desejável (DC)



Fonte: Sueyoshi e Goto (2016).

Elaboração dos autores.

Obs.: Ilustração reproduzida conforme o original (nota do Editorial).

14. Um limite econômico é de caráter ambiental, proposto por Georgescu-Roegen (1986). Pela lei da entropia, não é possível obter qualquer atividade produtiva de transformação sem um processo de degradação entrópica irreversível gerador de resíduos (leis da termodinâmica). Dessa forma, é possível reduzir a quantidade de resíduos através do aumento da ecoeficiência, mas há limites entrópicos intransponíveis a partir de determinado limiar (Georgescu-Roegen, 1986).

De forma similar, no gráfico 1B, a inclinação negativa indica a ocorrência de DC. A ocorrência implica que o aumento de um insumo ( $x$ ) aumenta o produto desejado ( $g$ ) e diminui o resultado indesejável ( $b$ ), fazendo com que a nação alcance tanto sucesso econômico quanto ambiental. O congestionamento desejável (DC) também é classificado nas três categorias: ausência, fraca ou forte. Esse tipo de congestionamento ocorre com a inovação em ecotecnologia sobre produtos indesejáveis. A ausência de DC pode garantir ocorrência de “sustentabilidade econômica”, em que uma nação pode alcançar sucesso econômico, mas sem capacidade de proteção ambiental.

Dessa forma, a ocorrência de UC é geralmente devido a um limite de capacidade econômica e em instalações de produção, podendo ocorrer sob disposição natural, enquanto que a de DC pode ser devido a inovação de tecnologia ecológica para mitigação da poluição, podendo estar presente na modelagem sob disposição gerencial (Sueyoshi e Goto, 2016).

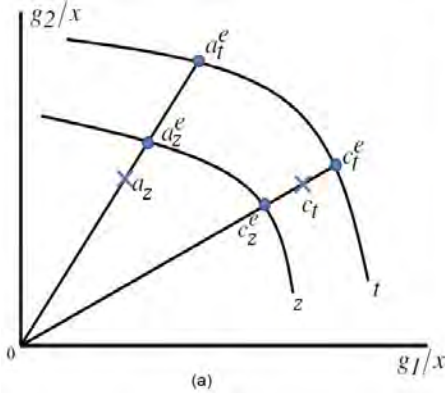
A aplicabilidade da DEA na avaliação ambiental, considerando congestionamentos desejáveis e indesejáveis, é documentada em estudos empíricos internacionais, especialmente nos setores industrial e de energia. Por exemplo, Sueyoshi e Yuan (2016b) compararam o desempenho de 25 nações da OCDE entre 2008 e 2012 para medir a taxa marginal de transformação e a taxa de substituição entre fatores de produção, focando o congestionamento desejável. Por sua vez, Sueyoshi e Goto (2016) mensuraram a ocorrência de congestionamento desejável em usinas de energia a carvão nos Estados Unidos e Sueyoshi e Wang (2018) buscaram congestionamentos na indústria petrolífera norte-americana. A China se destaca como principal foco desses estudos: Wu *et al.* (2013), Wu, Zhou e Zhou (2015) e Chen, Wang e Wang (2016) analisaram o setor industrial e seu desenvolvimento energético, enquanto Sueyoshi e Yuan (2016a) focaram o planejamento econômico e energético para a sustentabilidade social no país.

### 2.2.2 A mudança de fronteira em um horizonte de tempo: o índice de Malmquist

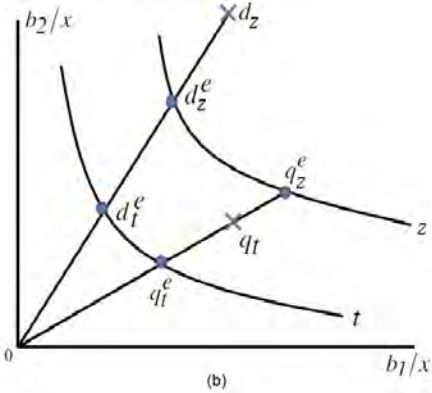
Para compreender a dinâmica de análise temporal aplicada ao DEA, por meio da medida do índice de Malmquist, considere dois períodos distintos ( $z$  e  $t$ , sendo  $z < t$ ). O gráfico 2, proposto por Sueyoshi e Goto (2013a), representa as mudanças de fronteira do período  $z$  para o período  $t$  sob disposição natural (gráfico 2A) e sob disposição gerencial (gráfico 2B), supondo a presença de inovação tecnológica entre os dois períodos. No gráfico 2A, considera-se um único insumo ( $x$ ), dois produtos desejáveis ( $g_1$  e  $g_2$ ), sendo a quantidade de resultados indesejados igual nos dois períodos. No gráfico 2B, considera-se um único insumo ( $x$ ), dois produtos indesejáveis ( $b_1$  e  $b_2$ ) e resultados desejáveis constantes nos dois períodos em questão.

**GRÁFICO 2**  
**Mudança de fronteira**

2A – Mudança de fronteira sob disposição natural



2B – Mudança de fronteira sob disposição gerencial



Fonte: Sueyoshi e Goto (2013a).  
Elaboração dos autores.  
Obs.: Ilustração reproduzida conforme o original (nota do Editorial).

No gráfico 2A,  $a_z$  representa o desempenho observado de uma DMU no  $z$ -ésimo período e  $c_t$ , o desempenho desta DMU no período  $t$ . O desempenho da referida DMU em  $z$  é projetado para  $a_z^e$  e  $a_t^e$ , fronteiras de eficiência dos períodos  $z$  e  $t$ , respectivamente. Sob a mesma hipótese, o desempenho da DMU em  $c_t$  é projetado para  $c_z^e$  na fronteira de eficiência para o período  $z$  e  $c_t^e$  na fronteira de eficiência para o período  $t$ .

Por meio de uma média geométrica, que é o próprio índice de Malmquist, é possível indicar o grau de desvio de fronteira entre os períodos  $z$  e  $t$  sob disposição natural ( $IN_z^t$ ), ou seja:

$$IN_z^t = \sqrt{\frac{0a_t^e \ 0c_t^e}{0a_z^e \ 0c_z^e}} = \sqrt{\frac{0a_t^e \ 0c_t^e}{0a_z \ 0c_t}} = \sqrt{\frac{0a_z \ 0c_t}{0a_z^e \ 0c_z^e}} \tag{1}$$

De forma análoga, o gráfico 2B descreve a mudança de fronteira sob disposição gerencial, em que  $d_z$  representa o desempenho observado de uma DMU no período  $z$  e  $q_t$ , o desempenho dessa mesma DMU no período  $t$ . O desempenho da DMU em  $d_z$  é projetado para  $d_z^e$  na fronteira de eficiência para o período  $z$  e  $d_t^e$  na fronteira de eficiência para o período  $t$ . Similarmente, o desempenho da referida DMU em  $t$  é projetado para  $q_z^e$  e  $q_t^e$ , fronteiras de eficiência dos períodos  $z$  e  $t$ , respectivamente.

Dessa forma, o índice de Malmquist entre os períodos  $z$  e  $t$  sob disposição gerencial ( $IM_z^t$ ) é dado por:

$$IM_z^t = \sqrt{\frac{0d_z^e 0q_z^e}{0d_t^e 0q_t^e}} = \sqrt{\frac{0d_z^e 0q_z^e}{0d_z^e 0q_t^e} \frac{0d_z^e 0q_z^e}{0d_t^e 0q_t^e}} \quad (2)$$

Assim, a análise temporal permite verificar a dinâmica da eficiência ao longo do tempo, identificando se houve progresso tecnológico, melhoria da eficiência total da DMU, ou ambos, para uma amostra.

A aplicabilidade do índice de Malmquist com foco ambiental já foi evidenciada em diversos estudos internacionais. Zhou, Ang e Han (2010), por exemplo, avaliaram o desempenho de emissões dos dezoito maiores emissores de CO<sub>2</sub> do mundo de 1997 a 2004, e Sueyoshi e Goto (2015b) examinaram se a mudança de fronteira, devido ao progresso tecnológico, ocorreu ou não na indústria do petróleo de 2005 a 2009. Sueyoshi e Goto (2013a), por sua vez, mensuraram o índice de Malmquist na indústria de energia de dez países industrializados. Em análises mais localizadas, Lei *et al.* (2013) utilizaram o índice de produtividade de Malmquist e dados da China de 1997 a 2008 para avaliarem a atratividade do investimento direto estrangeiro para o desenvolvimento sustentável, enquanto Graham (2009) empregou a metodologia para produzir uma medida de desempenho agrícola em fazendas selecionadas no sudeste da Austrália, sob a perspectiva da sociedade. Por fim, Sueyoshi e Goto (2015c) utilizaram a análise temporal da DEA para investigar o plano de energia futura no Japão, e Sueyoshi, Goto e Wang (2017) incorporaram uma estrutura do índice de Malmquist para examinar a mudança de fronteira relacionada ao desenvolvimento regional da China e à prevenção da poluição industrial.

### 3 METODOLOGIA

#### 3.1 Congestionamentos desejáveis e indesejáveis

Os modelos de eficiência unificada, tanto sob disposição natural quanto sob disposição gerencial, apesar de distinções teóricas, apresentam estruturas matemáticas e computacionais similares.<sup>15</sup> Dessa forma, considere que existam  $m$  insumos,  $s$  produtos desejáveis e  $h$  produtos indesejáveis para cada uma das  $n$  DMUs, a  $j$ -ésima DMU utiliza um conjunto de insumos (vetor de entrada  $X_j$ ) para gerar um vetor de saídas desejáveis ( $G_j$ ) e, indiretamente, um vetor de saídas indesejáveis ( $B_j$ ).

15. Para apresentação detalhada dos modelos DEA de mensuração da (in)eficiência unificada sob disposições natural e gerencial, sem a ocorrência de congestionamentos, consultar Sueyoshi e Goto (2012a, 2016, 2018).

Para examinar a ocorrência de congestionamento indesejável (UC) sob disposição natural, seguindo a estrutura metodológica proposta por Sueyoshi e Goto (2016, 2018), tem-se:

$$\begin{aligned} & \text{Maximize } \xi + \varepsilon_s \left[ \sum_{i=1}^m R_i^x d_i^{x-} + \sum_{r=1}^s R_r^g d_r^g \right] \\ & \text{sujeito a:} \\ & \sum_{j=1}^n x_{ij} \lambda_j + d_i^{x-} = x_{ik} \quad (i = 1, \dots, m), \\ & \sum_{j=1}^n g_{rj} \lambda_j - d_r^g - \xi g_{rk} = g_{rk} \quad (r = 1, \dots, s), \\ & \sum_{j=1}^n b_{fj} \lambda_j + \xi b_{fk} = b_{fk} \quad (f = 1, \dots, h), \\ & \sum_{j=1}^n \lambda_j = 1, \\ & \lambda_j \geq 0 (j = 1, \dots, n), d_i^{x-} \geq 0 (i = 1, \dots, m), d_r^g \geq 0 (r = 1, \dots, s) \end{aligned} \quad (3)$$

Na equação (3),  $\xi$  é um *score* de ineficiência desconhecido, indicando a distância entre a fronteira de eficiência e um vetor observado de saídas desejáveis (produção de bens e serviços) e indesejáveis (emissão de gases do efeito estufa); e  $\varepsilon_s$  é um número muito pequeno, de forma a reduzir a influência de folgas na função objetivo. Os intervalos de dados para ajuste são determinados pelos limites superior e inferior das entradas e dos resultados desejáveis e indesejáveis. Esses limites superior e inferior são especificados por:

$$\begin{aligned} R_i^x &= (m + s + h)^{-1} (\max\{x_{ij} | j = 1, \dots, n\} - \min\{x_{ij} | j = 1, \dots, n\})^{-1} \\ R_r^g &= (m + s + h)^{-1} (\max\{g_{rj} | j = 1, \dots, n\} - \min\{g_{rj} | j = 1, \dots, n\})^{-1} \\ R_f^b &= (m + s + h)^{-1} (\max\{b_{fj} | j = 1, \dots, n\} - \min\{b_{fj} | j = 1, \dots, n\})^{-1} \end{aligned} \quad (3.1)$$

Adicionalmente,  $d_i^{x-}$  e  $d_r^g$  são variáveis de folga relacionadas a insumos ( $x$ ) e produtos desejáveis ( $g$ ), respectivamente. O modelo (3) descarta variáveis de folga relacionadas a resultados indesejáveis ( $b$ ), de modo que elas são consideradas como restrições de igualdade. As outras restrições, relativas a insumos e produtos desejados, são consideradas como desigualdade. O vetor desconhecido,  $\lambda$ , é denominado como estrutural e é usado para conectar todos os fatores de produção por uma combinação convexa. Como a soma das variáveis estruturais é restrita à unidade

no modelo (3), os conjuntos de possibilidades de produção e poluição são estruturados sob retornos variáveis.<sup>16</sup> O modelo (3) tem a seguinte formulação dual:

$$\text{Minimize } \sum_{i=1}^m v_i x_{ik} - \sum_{r=1}^s u_r g_{rk} + \sum_{f=1}^h w_f b_{fk} + \sigma$$

sujeito a:

$$\sum_{i=1}^m v_i x_{ij} - \sum_{r=1}^s u_r g_{rj} + \sum_{f=1}^h w_f b_{fj} + \sigma \geq 0 \quad (j = 1, \dots, n), \quad (4)$$

$$\sum_{r=1}^s u_r g_{rk} + \sum_{f=1}^h w_f b_{fk} = 1,$$

$$v_i \geq \varepsilon_S R_i^x \quad (i = 1, \dots, m), u_r \geq \varepsilon_S R_r^b \quad (r = 1, \dots, s), w_f: \text{irrestrito} \quad (f = 1, \dots, h)$$

No modelo (4),  $v_i$ ,  $u_r$  e  $w_f$  são variáveis duais relacionadas aos primeiro, segundo e terceiro grupos de restrições do modelo (3). A variável dual ( $\sigma$ ) é obtida a partir da quarta equação do modelo (3).

A única diferença entre um modelo sem ocorrência de congestionamento indesejável e o modelo (4) é o fato de as variáveis  $w_f$  serem irrestritas no modelo com possibilidade de ocorrência de congestionamento. Um *score* de eficiência unificado ( $UEN_v^*$ ) da  $k$ -ésima DMU sob disposição natural é medido:

$$\begin{aligned} UEN_v^* &= 1 - \left[ \xi^* + \varepsilon_S \left( \sum_{i=1}^m R_i^x d_i^{x-*} + \sum_{r=1}^s R_r^g d_r^{g*} \right) \right] \\ &= 1 - \left[ \sum_{i=1}^m v_i^* x_{ik} - \sum_{r=1}^s u_r^* g_{rk} + \sum_{f=1}^h w_f^* b_{fk} + \sigma^* \right] \end{aligned} \quad (5)$$

No modelo (5), todas as variáveis são determinadas na otimalidade dos modelos (3) e (4). A eficiência unificada é obtida subtraindo o nível de ineficiência da unidade. Dessa forma, uma possível ocorrência de congestionamento indesejável (UC) é determinada pela seguinte regra: i) se  $w_f^* < 0$  para pelo menos um produto indesejável ( $f$ ), então ocorre UC forte na  $k$ -ésima DMU; ii) se  $w_f^* > 0$  para todos os produtos indesejáveis ( $f$ ), então não há ocorrência de UC na  $k$ -ésima DMU; e iii) se  $w_f^* = 0$  para pelo menos um produto indesejável ( $f$ ), então ocorre UC fraca na  $k$ -ésima DMU.

Já sob disposição gerencial é possível identificar a ocorrência de congestionamento desejável (DC). Para examinar tal ocorrência, descartam-se as variáveis

16. O problema de programação linear com retornos variáveis pode ser modificado para atender à pressuposição de retornos constantes, bastando remover a restrição de convexidade,  $\sum_{j=1}^n \lambda_j = 1$ , do modelo (3).

de folga nos produtos desejados ( $g$ ) e inserem-se as variáveis de folga relacionadas as saídas indesejáveis ( $d_f^b$ ):

$$\text{Maximize } \xi + \varepsilon_S \left[ \sum_{i=1}^m R_i^x d_i^{x+} + \sum_{f=1}^h R_f^b d_f^b \right]$$

sujeito a:

$$\begin{aligned} \sum_{j=1}^n x_{ij} \lambda_j - d_i^{x+} &= x_{ik} & (i = 1, \dots, m), \\ \sum_{j=1}^n g_{rj} \lambda_j - \xi g_{rk} &= g_{rk} & (r = 1, \dots, s), \\ \sum_{j=1}^n b_{fj} \lambda_j + d_f^b + \xi b_{fk} &= b_{fk} & (f = 1, \dots, h), \\ \sum_{j=1}^n \lambda_j &= 1, \\ \lambda_j &\geq 0 \quad (j = 1, \dots, n), d_i^{x+} \geq 0 \quad (i = 1, \dots, m), d_f^b \geq 0 \quad (f = 1, \dots, h). \end{aligned} \quad (6)$$

O modelo (6) elimina as variáveis de folga relacionadas aos resultados desejados, tornando-se, assim, restrições de igualdade. Os outros grupos de restrições em insumos e produtos indesejáveis mantêm as folgas para que possam ser consideradas como restrições de desigualdade. O modelo (6) tem formulação dual similar à equação (4), com possibilidade de ocorrência de congestionamento desejável.

Uma pontuação de eficiência unificada ( $UEM_v^*$ ) da  $k$ -ésima DMU sob disposição gerencial é obtida subtraindo o nível de ineficiência da unidade:

$$\begin{aligned} UEM_v^* &= 1 - \left[ \xi^* + \varepsilon_S \left( \sum_{i=1}^m R_i^x d_i^{x+*} + \sum_{f=1}^h R_f^b d_f^{b*} \right) \right] \\ &= 1 - \left[ - \sum_{i=1}^m v_i^* x_{ik} - \sum_{r=1}^s u_r^* g_{rk} + \sum_{f=1}^h w_f^* b_{fk} + \sigma^* \right] \end{aligned} \quad (7)$$

No modelo (7), todas as variáveis são determinadas na otimalidade dos modelos (6) e sua formulação dual. Uma possível ocorrência de congestionamento desejável (DC) é determinada pela seguinte regra: i) se  $u_r^* < 0$  para pelo menos um produto desejável ( $r$ ), então ocorre DC forte na  $k$ -ésima DMU; ii) se  $u_r^* > 0$  para todos os produtos desejáveis ( $r$ ), então não há ocorrência de DC na  $k$ -ésima DMU; e iii) se  $u_r^* = 0$  para pelo menos um produto desejável ( $r$ ), então ocorre DC fraca na  $k$ -ésima DMU.

### 3.2 Análise temporal da eficiência unificada

A mensuração comparativa, em um horizonte temporal, dos desempenhos operacional e ambiental, sob disposição natural das  $n$  DMUs analisadas neste trabalho, é realizada pelo índice de Malmquist. O índice de Malmquist entre os dois períodos é descrito por um deslocamento de fronteira proveniente de um progresso tecnológico (conforme apresentado no gráfico 2). Dessa forma, o índice de Malmquist, sob disposição natural, entre os períodos  $z$  e  $t$  pode ser escrito, conforme Sueyoshi e Goto (2013a, 2018) e equação (1):

$$IN_z^t = \sqrt{\frac{UEN_z^R}{IUIN_{z \rightarrow t}^R} \frac{IUIN_{t \rightarrow z}^R}{UEN_t^R}} \quad (8)$$

No modelo (8),  $UEN_z^R$  e  $UEN_t^R$  são duas medidas de eficiência que pertencem a um intervalo entre zero (ineficiência total) e um (eficiência total); e  $IUIN_{t \rightarrow z}^R$  e  $IUIN_{z \rightarrow t}^R$  são medidas de eficiência intertemporais que podem se tornar maiores ou menores que a unidade, dependendo da ocorrência de um cruzamento de fronteira entre os dois períodos.

Os valores de  $UEN_z^R$ ,  $UEN_t^R$ ,  $IUIN_{z \rightarrow t}^R$  e  $IUIN_{t \rightarrow z}^R$  são formulados por meio de modelos DEA. O cálculo de  $UEN_t^R$  na  $k$ -ésima DMU para o período  $t$ , sob disposição natural e retornos constantes é iniciado pelo modelo:

$$\begin{aligned} & \text{Maximize } \xi + \varepsilon_s \left[ \sum_{i=1}^m R_i^x d_i^{x-} + \sum_{r=1}^s R_r^g d_r^g + \sum_{f=1}^h R_f^b d_f^b \right] \\ & \text{sujeito a:} \\ & \sum_{j \in J_t} x_{ijt} \lambda_{jt} + d_i^{x-} = x_{ikt} \quad (k \in J_t; i = 1, \dots, m), \\ & \sum_{j \in J_t} g_{rjt} \lambda_{jt} - d_r^g - \xi g_{rkt} = g_{rkt} \quad (k \in J_t; r = 1, \dots, s), \\ & \sum_{j \in J_t} b_{fjt} \lambda_{jt} + d_f^b + \xi b_{fkt} = b_{fkt} \quad (k \in J_t; f = 1, \dots, h), \\ & \lambda_{jt} \geq 0 (j = 1, \dots, n), d_i^{x-} \geq 0 (i = 1, \dots, m), d_r^g \geq 0 (r = 1, \dots, s), d_f^b \geq 0 (f = 1, \dots, h) \end{aligned} \quad (9)$$

No modelo (9),  $d_i^{x-}$ ,  $d_r^g$  e  $d_f^b$  são as variáveis de folga relacionadas a entradas, saídas desejáveis e saídas indesejáveis, respectivamente;  $\lambda_{jt}$  é um vetor de coluna de variáveis “estruturais”, usadas para conectar fatores de produção;  $\xi$  representa a medida de ineficiência;  $\varepsilon_s$  representa um número muito pequeno para indicar a importância relativa entre a pontuação de ineficiência e a quantidade total de folgas. Os intervalos de dados para ajuste são determinados pelos limites superior e inferior das entradas e dos resultados desejáveis e indesejáveis. Esses limites superior e inferior são especificados por:

$$\begin{aligned}
 R_i^x &= (m + s + h)^{-1} (\max\{x_{ij} | j \in J_z \cup J_t \cup \dots J_T\} \\
 &\quad - \min\{x_{ij} | j \in J_z \cup J_t \cup \dots J_T\})^{-1} \\
 R_r^g &= (m + s + h)^{-1} (\max\{g_{rj} | j \in J_z \cup J_t \cup \dots J_T\} \\
 &\quad - \min\{g_{rj} | j \in J_z \cup J_t \cup \dots J_T\})^{-1} \\
 R_f^b &= (m + s + h)^{-1} (\max\{b_{fj} | j \in J_z \cup J_t \cup \dots J_T\} \\
 &\quad - \min\{b_{fj} | j \in J_z \cup J_t \cup \dots J_T\})^{-1}
 \end{aligned} \tag{9.1}$$

No modelo (9.1),  $J_z \cup J_t$  representa a união de todas as DMUs nos períodos  $z$  e  $t$ .

O valor de  $UEN_t^R$ , para a  $k$ -ésima DMU no período  $t$  é determinado por:

$$UEN_t^R = 1 - \left[ \xi^* + \varepsilon_S \left( \sum_{i=1}^m R_i^x d_i^{x-*} + \sum_{r=1}^s R_r^g d_r^{g*} + \sum_{f=1}^h R_f^b d_f^{b*} \right) \right] \tag{10}$$

No modelo (10), os valores entre colchetes são determinados na otimalidade do modelo (9).

A base de cálculo de  $UEN_z^R$  na  $k$ -ésima DMU para o período  $z$ , sob disposição natural e retornos constantes segue a mesma estrutura do modelo (9), substituindo o subscrito  $t$  pelo subscrito  $z$ . O valor de  $UEN_z^R$ , para a  $k$ -ésima DMU no período  $z$ , é determinado pela equação (10), em que a pontuação ineficiente e as folgas na otimização (entre colchetes) são medidas pelo modelo (9) após a substituição de  $t$  por  $z$  na formulação.

O cálculo de  $IUIN_{z \rightarrow t}^R$  é baseado na otimização da  $k$ -ésima DMU do período  $z$  para o grupo de DMUs do período  $t$ , determinado por:

$$\begin{aligned}
 & \text{Maximize } \xi + \varepsilon_S \left[ \sum_{i=1}^m R_i^x d_i^{x-} + \sum_{r=1}^s R_r^g d_r^g + \sum_{f=1}^h R_f^b d_f^b \right] \\
 & \text{sujeito a:} \\
 & \sum_{j \in J_t} x_{ijt} \lambda_{jt} + d_i^{x-} = x_{ikz} \quad (k \in J_z; i = 1, \dots, m), \\
 & \sum_{j \in J_t} g_{rjt} \lambda_{jt} - d_r^g - \xi g_{rkz} = g_{rkz} \quad (k \in J_z; r = 1, \dots, s), \\
 & \sum_{j \in J_t} b_{fjt} \lambda_{jt} + d_f^b + \xi b_{fkz} = b_{fkz} \quad (k \in J_z; f = 1, \dots, h), \\
 & \lambda_{jt} \geq 0 \ (j = 1, \dots, n), d_i^{x-} \geq 0 \ (i = 1, \dots, m), d_r^g \geq 0 \ (r = 1, \dots, s), d_f^b \geq 0 \ (f = 1, \dots, h)
 \end{aligned} \tag{11}$$

O valor do  $IUIN_{z \rightarrow t}^R$  é medido pela equação (10), em que a medida de ineficiência e todas as variáveis de folga são determinadas na otimalidade do modelo (11).

Já o cálculo de  $IUIN_{i \rightarrow z}^R$  é baseado na otimização da  $k$ -ésima DMU do período  $t$  para o grupo de DMUs do período  $z$ , determinado por:

$$\begin{aligned}
& \text{Maximize } \xi + \varepsilon_s \left[ \sum_{i=1}^m R_i^x d_i^{x-} + \sum_{r=1}^s R_r^g d_r^g + \sum_{f=1}^h R_f^b d_f^b \right] \\
& \text{sujeito a:} \\
& \sum_{j \in J_t} x_{ijz} \lambda_{jz} + d_i^{x-} = x_{ikt} \quad (k \in J_t; i = 1, \dots, m), \\
& \sum_{j \in J_t} g_{rjz} \lambda_{jz} - d_r^g - \xi g_{rkt} = g_{rkt} \quad (k \in J_t; r = 1, \dots, s), \\
& \sum_{j \in J_t} b_{fjz} \lambda_{jz} + d_f^b + \xi b_{fkt} = b_{fkt} \quad (k \in J_t; f = 1, \dots, h), \\
& \lambda_{jz} \geq 0 (j = 1, \dots, n), d_i^{x-} \geq 0 (i = 1, \dots, m), d_r^g \geq 0 (r = 1, \dots, s), d_f^b \geq 0 (f = 1, \dots, h).
\end{aligned} \tag{12}$$

Assim como nas análises anteriores, o valor do  $IUIM_{t \rightarrow z}^R$  é medido pela equação (10), em que a medida de ineficiência e todas as variáveis de folga são determinadas na otimalidade do modelo (12).

O índice de Malmquist sob disposição gerencial entre os períodos  $z$  e  $t$  ( $IM_z^t$ ) tem estrutura similar ao sob disposição natural e, conforme Sueyoshi e Goto (2013a, 2018) e equação (2), é dado por:

$$IM_z^t = \sqrt{\frac{UEM_z^R}{IUIM_{z \rightarrow t}^R} \frac{IUIM_{t \rightarrow z}^R}{UEM_t^R}} \tag{13}$$

No modelo (13),  $UEM_z^R$ ,  $UEM_t^R$ ,  $IUIM_{z \rightarrow t}^R$  e  $IUIM_{t \rightarrow z}^R$  são subcomponentes mensurados por meio de modelos DEA sob retornos constantes. O modelo DEA para mensurar o valor de  $UEM_z^R$  é dado por:

$$\begin{aligned}
& \text{Maximize } \xi + \varepsilon_s \left[ \sum_{i=1}^m R_i^x d_i^{x+} + \sum_{r=1}^s R_r^g d_r^g + \sum_{f=1}^h R_f^b d_f^b \right] \\
& \text{sujeito a:} \\
& \sum_{j \in J_t} x_{ijz} \lambda_{jz} + d_i^{x+} = x_{ikz} \quad (k \in J_z; i = 1, \dots, m), \\
& \sum_{j \in J_t} g_{rjz} \lambda_{jz} - d_r^g - \xi g_{rkz} = g_{rkz} \quad (k \in J_z; r = 1, \dots, s), \\
& \sum_{j \in J_t} b_{fjz} \lambda_{jz} + d_f^b + \xi b_{fkz} = b_{fkz} \quad (k \in J_z; f = 1, \dots, h), \\
& \lambda_{jz} \geq 0 (j = 1, \dots, n), d_i^{x+} \geq 0 (i = 1, \dots, m), d_r^g \geq 0 (r = 1, \dots, s), d_f^b \geq 0 (f = 1, \dots, h)
\end{aligned} \tag{14}$$

O valor de  $UEM_z^R$ , para a  $k$ -ésima DMU no período  $z$ , sob disposição gerencial, é determinado por:

$$UEM_z^R = 1 - \left[ \xi^* + \varepsilon_S \left( \sum_{i=1}^m R_i^x d_i^{x^{**}} + \sum_{r=1}^s R_r^g d_r^{g^*} + \sum_{f=1}^h R_f^b d_f^{b^*} \right) \right] \quad (15)$$

A base de cálculo de  $UEM_t^R$  na  $k$ -ésima DMU para o período  $t$ , sob disposição gerencial e retornos constantes, segue a mesma estrutura do modelo (14), substituindo o subscrito  $z$  pelo subscrito  $t$ . O valor de  $UEM_t^R$ , para a  $k$ -ésima DMU no período  $t$  é determinado pela equação (15), em que a pontuação ineficiente e as folgas na otimização (entre colchetes) são medidas pelo modelo (14) após a substituição de  $z$  por  $t$  na formulação.

Os modelos DEA para mensurar as medidas de eficiência intertemporais  $IUIM_{z \rightarrow t}^R$  e  $IUIM_{t \rightarrow z}^R$ , sob disposição gerencial, seguem as mesmas estruturas e orientações dos modelos (11) e (12), respectivamente. Os resultados da otimização são deduzidos da unidade, conforme equações a seguir.

$$IUIM_{z \rightarrow t}^R = 1 - \left[ \xi^* + \varepsilon_S \left( \sum_{i=1}^m R_i^x d_i^{x^{**}} + \sum_{r=1}^s R_r^g d_r^{g^*} + \sum_{f=1}^h R_f^b d_f^{b^*} \right) \right] \quad (16)$$

$$IUIM_{t \rightarrow z}^R = 1 - \left[ \xi^* + \varepsilon_S \left( \sum_{i=1}^m R_i^x d_i^{x^{**}} + \sum_{r=1}^s R_r^g d_r^{g^*} + \sum_{f=1}^h R_f^b d_f^{b^*} \right) \right] \quad (17)$$

### 3.3 Base de dados e variáveis utilizadas

A base de dados do Banco Mundial (DataBank) foi selecionada pela sua reconhecida robustez, confiabilidade e pela abrangência global dos dados disponíveis.<sup>17</sup> O DataBank é uma ferramenta de análise e visualização que contém um conjunto importante de dados de séries temporais em diversos tópicos e de diversas fontes. Sua utilização permite realizar uma análise comparativa consistente da eficiência produtiva e ambiental dos países no período analisado, o que a torna especialmente adequada para estudos empíricos internacionais relacionados à sustentabilidade e ecoeficiência (Sueyoshi e Yuan, 2017).

Os dados utilizados são referentes aos anos de 2006, 2008, 2010, 2012 e 2014. Foram considerados os 109 países que apresentavam disponibilidade de informações nos anos analisados. Os modelos de programação matemática para os diferentes cenários metodológicos foram construídos e estimados usando o *software* GAMS.

Para a obtenção das medidas de eficiência unificada, utilizaram-se as variáveis a seguir, em que  $X_i$  representa os insumos,  $G_i$  o produto desejável e  $B_i$  os produtos indesejáveis:

17. Disponível em: <https://data.worldbank.org/indicator/>. Acesso em: 9 dez. 2020.

- $X_1$ : força de trabalho, composta pelo fornecimento de mão de obra, de 15 anos de idade ou mais, para a produção de bens e serviços de uma economia, em milhões de trabalhadores;
- $X_2$ : formação bruta de capital fixo (FBCF), que consiste no desembolso de adições ao imobilizado mais as mudanças líquidas no nível de estoques de uma economia, em bilhões de dólares internacionais (paridade do poder de compra – PPC);
- $X_3$ : consumo de energia, referente ao uso de energia primária antes da transformação para outros combustíveis de uso final como insumos, em bilhões de quilogramas de óleo equivalente;
- $X_4$ : esgotamento de recursos naturais, representado pela soma do esgotamento líquido da floresta, do esgotamento de energia e da extração mineral, em bilhões de dólares internacionais (PPC) – baseado no percentual da renda nacional bruta;
- $G_1$ : produto interno bruto (PIB), composto pela soma do valor agregado bruto de todos os residentes no ano, em bilhões de dólares internacionais (PPC);
- $B_1$ : emissão de  $CO_2$ , dióxido de carbono emitido em decorrência da queima de combustíveis fósseis e da fabricação de cimento, em mil quilotoneladas; e
- $B_2$ : outras emissões totais, emissões de gases de efeito estufa das diversas estruturas produtivas (indústria, serviços, agricultura, pecuária, extração florestal etc.), derivadas de metano ( $CH_4$ ), óxido nitroso ( $N_2O$ ), clorofluorcarbonos (CFCs), hidrofluorcarbonos (HFCs), perfluorcarbonos (PFCs) e hexafluoreto de enxofre ( $SF_6$ ), em mil quilotoneladas de  $CO_2$  equivalente.

### 3.4 Análise e ajustes nos dados

Como em qualquer técnica empírica, o modelo DEA<sup>18</sup> é baseado em suposições, necessitando serem reconhecidas e avaliadas, como a sensibilidade a erros de medida, a impossibilidade em comparar os escores de eficiência entre diferentes estudos e a sensibilidade à especificação dos fatores e ao tamanho do grupo sob análise. Dessa forma, importantes análises e tratamentos foram considerados neste trabalho, a saber: i) ajuste de dados, dividindo todas as observações do insumo/produto pela

---

18. Existem vários outros modelos e pressuposições que podem ser incorporados na formulação dos problemas de programação utilizados pela DEA, inclusive em análise ambientais. Para descrições mais detalhadas da metodologia, recomenda-se a consulta de livros e textos como Coelli *et al.* (2005), Cooper, Seiford e Zhu (2011), Sueyoshi e Goto (2018) e Ferreira e Gomes (2020).

média do respectivo insumo/produto, conforme sugerido por Sueyoshi e Goto (2013b); ii) método de detecção e remoção de *outliers*, utilizando a metodologia “*jackstrap*”, desenvolvida por Sousa e Stosic (2003) a partir dos métodos *jackknife* e *bootstrap*;<sup>19</sup> e iii) testes não paramétricos *U* de Mann-Whitney de fronteiras de eficiência (Banker, Zheng e Natarajan, 2010), de forma a verificar se as nações estudadas, mesmo com estratos de produção (e poluição) diferentes, fazem parte de uma mesma fronteira de eficiência ou se cada estrato de produção gera sua própria fronteira.<sup>20</sup> Os tratamentos (ii) e (iii) foram realizados apenas para o modelo DEA sob disposição natural, pelo fato de apresentarem características mais próximas aos modelos DEA convencionais (nos quais os métodos citados foram desenvolvidos).

Segundo as análises realizadas, não houve a ocorrência de observações discrepantes em relação à média (*outliers*), fato que seria suficiente para deslocar a fronteira e aumentar o nível médio de eficiência de forma artificial, comprometendo o nível de eficiência das demais DMUs e, conseqüentemente, a confiabilidade dos resultados. Por sua vez, os resultados do teste de *U* de Mann-Whitney evidenciaram que os grupos considerados na análise pertencem a uma mesma população e, dessa forma, não há diferenças significativas nas fronteiras de eficiência, uma vez que o tamanho da produção não afeta a eficiência calculada.<sup>21</sup>

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 Análises estatísticas preliminares

Antes de analisar os resultados dos modelos, precedeu-se com a análise de correlação entre insumos e produtos utilizados, bem como as estatísticas descritivas dessas variáveis. Os coeficientes de correlação de Pearson são elevados e significativos (a um nível de significância de 1%), indicando a forte interação entre insumos e produtos utilizados nos modelos, fator importante na metodologia DEA.

Já as estatísticas descritivas dos insumos e produtos utilizados nos modelos para os anos de 2006 e 2014 estão apresentadas na tabela 1. É possível observar a alta heterogeneidade dos países quanto aos diferentes insumos e produtos, com destaque para o PIB e as emissões de CO<sub>2</sub>.<sup>22</sup>

19. Para detalhes sobre a metodologia e os critérios de definição de *outliers*, consultar Sousa e Stosic (2003, 2005).

20. No presente caso, os países foram divididos em três estratos de acordo com o PIB no ano de 2014: um terço dos países com maior PIB; um terço dos países com PIB intermediário; um terço dos países com menor PIB.

21. O teste de *U* de Mann-Whitney também foi realizado para três estratos de países divididos de acordo com os níveis de emissões de CO<sub>2</sub> no ano de 2014. Contudo, os estratos divididos de acordo com as emissões de CO<sub>2</sub> apresentam composições similares aos estratos divididos de acordo com o PIB, garantindo os mesmos resultados no teste.

22. Tais diferenças poderiam sugerir, inicialmente, a presença de mais de uma fronteira de eficiência, visto a possibilidade de diferentes estruturas tecnológicas produtivas. Contudo, o teste não paramétrico *U* de Mann-Whitney, anteriormente apresentado, rejeita a hipótese de existência de distintas fronteiras, inserindo os 109 países estudados em uma mesma população.

**TABELA 1**  
**Estatísticas descritivas das variáveis de entrada e de saída dos modelos (2006 e 2014)**

Input/output	Média		Máximo		Mínimo		Coeficiente de variação (%)	
	2006	2014	2006	2014	2006	2014	2006	2014
Força de trabalho (1 milhão)	25,56	27,68	770,37	786,57	0,18	0,21	315,08	325,46
FBCF (US\$ 1 bilhão)	107,95	172,35	3.166,02	4.721,38	0,12	1,06	201,05	332,50
Energia total (1 bilhão kg)	98,77	114,09	2.296,82	3.051,50	1,33	1,81	264,97	326,35
Recursos naturais (US\$ 1 bilhão)	17,26	19,15	272,07	357,93	0,01	0,01	212,79	258,68
Emissões de CO <sub>2</sub> (1 mil kt)	249,63	294,91	6.529,29	10.291,93	0,69	2,13	288,09	382,40
Emissões totais (1 mil kt)	395,17	438,07	8.573,40	12.454,71	8,03	7,43	257,75	319,23
PIB PPP (US\$ 1 bilhão)	618,95	954,31	13.855,89	18.336,44	6,14	10,70	171,10	270,19

Elaboração dos autores.

Observa-se, ainda, que todos os valores máximos de *inputs* e *outputs* em 2014 pertencem à China, indicando as dimensões continentais do país. Em 2006, FBCF, energia e PIB são liderados pelos Estados Unidos e os demais, também pela China. Já os valores mínimos para as diferentes variáveis encontram-se distribuídos entre países africanos (Zimbábue – FBCF<sub>2006</sub>; Togo – FBCF<sub>2014</sub> e PIB; Namíbia – energia; Senegal – recursos naturais<sub>2006</sub>; Níger – emissões de CO<sub>2</sub>), asiático (Brunei – força de trabalho), latino-americano (Panamá – recursos naturais<sub>2014</sub>) e europeus (Albânia – emissões totais<sub>2006</sub>; Chipre – emissões totais<sub>2014</sub>). Os valores dos coeficientes de variação reforçam as diferentes estruturas produtivas nacionais que estão sendo estudadas, além de indicarem possíveis diferenciais na escala de produção e poluição dos países.

#### 4.2 A ocorrência de congestionamentos desejáveis e indesejáveis na economia mundial

Esta subseção considera a análise de eficiência com a possibilidade de congestionamentos na produção. A identificação do congestionamento indesejável (UC) é importante para evitar um aumento nos custos e uma falta de capacidade produtiva no país. Já a identificação do congestionamento desejável (DC) é fundamental em termos de crescimento sustentável, no qual a inovação de ecotecnologia pode efetivamente reduzir a quantidade de vários tipos de poluentes.

A ocorrência de UC é um fenômeno no qual um aumento em alguns insumos diminui alguns produtos desejados, mas mantém, ou mesmo amplia, os resultados indesejados. A expectativa é que um aumento nos insumos leve a um aumento em

alguns componentes de vetores de saída desejáveis e indesejáveis. Tal ocorrência de UC pode ser encontrada nas diversas atividades econômicas de um país (agricultura, indústria e serviços). O quadro A.1 (apêndice A) apresenta a análise dos países considerando a possibilidade de UC, com a classificação desta UC (fraca e forte), quando de sua ocorrência.

Observa-se que a maioria dos países exibem a condição de UC forte (77,1% ou 84 países), indicando que tais nações podem enfrentar a ocorrência de um limite de capacidade na produção. Características geográficas e níveis de desenvolvimento econômico não influenciam o fato de o país apresentar ou não UC; ademais, não há países que apresentam UC fraca. A presença de UC pode tornar-se um sério empecilho à alocação eficiente dos insumos no processo produtivo.

Já a possibilidade de ocorrência de DC se dá quando um aumento em alguns insumos diminui alguns resultados indesejados, sem prejudicar a produção dos bens e serviços desejáveis. A ocorrência de DC somente é possível devido à inovação em ecotecnologia. O quadro A.1 (apêndice A) apresenta a análise dos países considerando a possibilidade de DC, com a classificação desta DC (fraca e forte), quando de sua ocorrência.

A condição de DC é encontrada em um número limitado de países, se comparada à UC: dois países (China e Tanzânia) exibem a possibilidade de DC fraca e vinte países<sup>23</sup> apresentam a condição de DC forte.

Ao analisar os países com possibilidade de congestionamento desejável é possível realizar, de maneira geral, duas constatações. Primeiramente, esses países apresentam baixa produtividade energética ( $PIB/energia$ ) e, conseqüentemente, reduzida razão  $PIB/CO_2$  – visto que o consumo de energia é essencial para o setor produtivo dos países e esse consumo é responsável por parte considerável das emissões de dióxido de carbono ( $CO_2$ ) e outros gases poluentes –, tal como evidenciado por diversos estudos empíricos, como Quadrelli e Peterson (2007), Halicioglu (2009) e Nejat *et al.* (2015). Observa-se, também, um valor alto na razão entre os insumos consumo de energia e formação bruta de capital fixo ( $energia/FBCF$ ) para as nações pertencentes a esse grupo, indicando que os investimentos produtivos, inclusive em tecnologias poupadoras de energia, podem estar aquém do desejado.

Dessa forma, faz-se plausível indicar que o aumento do insumo FBCF, especialmente em tecnologias limpas para matriz energética, ampliaria a produtividade e a qualidade ambiental da energia. Por conseguinte, reduzir-se-iam as emissões de  $CO_2$  e outros poluentes, tipificando o conceito de congestionamento desejável. Ademais, o acréscimo da FBCF poderia ocasionar a elevação do PIB

23. África do Sul, Austrália, Bahrain, Bósnia e Herzegovina, Canadá, Coreia do Sul, Costa do Marfim, Estônia, Finlândia, Gabão, Gana, Geórgia, Moçambique, Moldávia, Nepal, Omã, Quirguistão, Togo, Ucrânia e Zimbábue.

e seus resultados, fazendo com que os países com DC forte alcançassem tanto a sustentabilidade econômica quanto a ambiental.

Contudo, cabe ressaltar que não é tão simples, principalmente para os países mais pobres, ampliar o estoque de capital. Apesar disso, políticas globais de mitigação dos efeitos danosos ao meio ambiente, através de investimentos globais em matrizes energéticas limpas, podem ser uma alternativa para que os benefícios do congestionamento desejável sejam efetivamente alcançados.

Entre os países com possibilidade de congestionamento desejável, apesar da indicação de DC fraca, destaca-se a China. Mesmo apresentando desafios internos para alcançar a sustentabilidade ambiental, tal como o interesse em manter elevado o crescimento econômico, o governo despande cada vez mais esforços para mitigar as elevadas taxas de emissão de gases do efeito estufa. Nesse sentido, os chineses agem em duas frentes: doméstica e internacional. Na primeira esfera, as estratégias ambientais traçam desde nortes mais gerais, como a adoção do desenvolvimento sustentável como orientação-chave, até objetivos mais específicos, tais como a Campanha Nacional de Arborização e o desenvolvimento de energias renováveis e de baixo carbono (Moreira e Ribeiro, 2016). No plano externo, a participação em encontros e conferências globais e a aderência às metas propostas demonstram a importância atribuída pelos chineses à ordem ambiental internacional para conter as mudanças climáticas (Moreira e Ribeiro, 2016). Além disso, o desenvolvimento do sistema de comércio de emissões de carbono, iniciado em 2011, e de projetos de mecanismo de desenvolvimento limpo (MDL) pelas autoridades chinesas podem estar contribuindo para que o país alcance novos patamares de sustentabilidade ambiental (Vital, 2018).

Como resultado desses esforços, em 2014, apesar da alta taxa de poluição, as emissões de CO<sub>2</sub> foram estabilizadas (WEF, 2014), expondo que a China, embora seja um país com desafios internos (grandes dimensões territorial, populacional e econômica), busca a sustentabilidade ambiental, configurando-se como uma nação com potencial de congestionamento desejável.

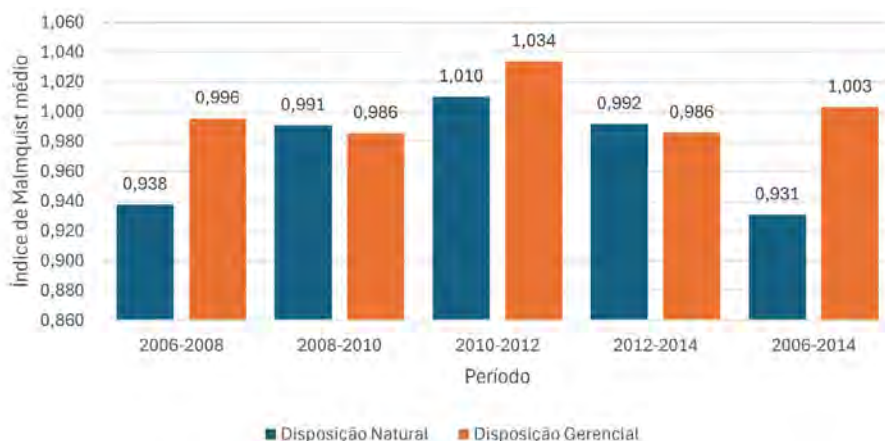
No que se refere aos efeitos de congestionamento, o Brasil apresentou UC forte, sem indicação de DC. Esse resultado sugere que o país sofre com a má alocação ou uso excessivo de insumos ou fatores associados à produção de desempenhos ambientais indesejados, como as emissões de CO<sub>2</sub>. Em outras palavras, a presença de UC forte indica que, dadas as condições tecnológicas, o Brasil poderia produzir os mesmos níveis de produto desejável com menos emissão de poluentes, caso alocasse de forma mais eficiente seus recursos produtivos. Esse tipo de ineficiência tende a refletir falhas em políticas ambientais, incentivos distorcidos ou baixa integração entre crescimento econômico e sustentabilidade.

Ao se comparar com países emergentes que também exibiram UC forte, como Índia, Indonésia e África do Sul, observa-se um padrão de congestionamento ambiental comum entre economias em desenvolvimento que enfrentam pressões simultâneas por crescimento e controle ambiental. A ausência de DC no caso brasileiro, contudo, sugere que não há evidências de uso ineficiente dos fatores no que diz respeito à produção do produto desejável (PIB), o que reforça a interpretação de que a ineficiência observada se concentra sobretudo na dimensão ambiental. Esses resultados trazem implicações importantes para a formulação de políticas públicas, ao apontar que ganhos de eficiência ambiental são possíveis mesmo sem comprometer o desempenho econômico, desde que se reduza o grau de congestionamento indesejável.

### 4.3 Análise temporal da eficiência unificada

A análise temporal da eficiência unificada, com base no índice de Malmquist, permite investigar a dinâmica do desempenho econômico e ambiental dos países ao longo do tempo. Ao considerar as disposições natural e gerencial, é possível identificar os fatores que impulsionam ganhos ou perdas de eficiência em distintos contextos institucionais e estruturais. Essa abordagem oferece uma perspectiva abrangente sobre a sustentabilidade, ao combinar elementos relacionados à capacidade de crescimento econômico com aqueles voltados à mitigação dos impactos ambientais. O gráfico 3 apresenta os principais resultados obtidos para o período de 2006 a 2014.

GRÁFICO 3  
Índices de Malmquist sob disposição natural e gerencial



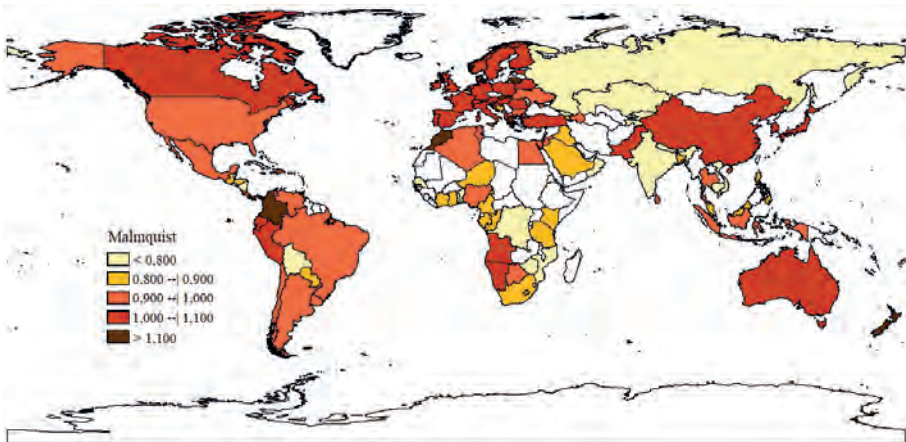
Elaboração dos autores.

Obs.: Ilustração reproduzida conforme o original (nota do Editorial).

Uma variação positiva do índice de Malmquist, sob disponibilidade natural, indica um potencial de crescimento econômico. Enquanto isso, uma mudança de índice sob disponibilidade gerencial implica um potencial de prevenção nos danos ambientais. Ambas as medidas, combinadas, implicam um potencial total sobre como alcançar o nível mais alto de sustentabilidade.

A tabela A.1 (apêndice A) resume os índices de Malmquist dos 109 países sob disposição natural. Verifica-se que os ganhos de eficiência ( $IN_z^t > 1$ ), sob disposição natural (figura 1), são encontrados em países de todos os continentes, apesar de a maior concentração estar na Europa. Já as perdas de eficiência ( $IN_z^t < 1$ ) estão concentradas nos países asiáticos e africanos.

FIGURA 1  
Índices de Malmquist dos 109 países sob disposição natural (2006-2014)



Elaboração dos autores.

Obs.: Ilustração reproduzida conforme o original (nota do Editorial).

Observa-se, ainda, que os ganhos/perdas de eficiência, mensurados pelo índice de Malmquist, não apresentam relações diretas com o crescimento econômico dos países (variação do PIB) nem com as variações das emissões nos períodos. Contudo, pode-se verificar que os países que apresentaram as maiores perdas de eficiência apresentam, também, baixos indicadores de competitividade global (WEF, 2014), principalmente em subíndices relacionados a fatores de inovação.

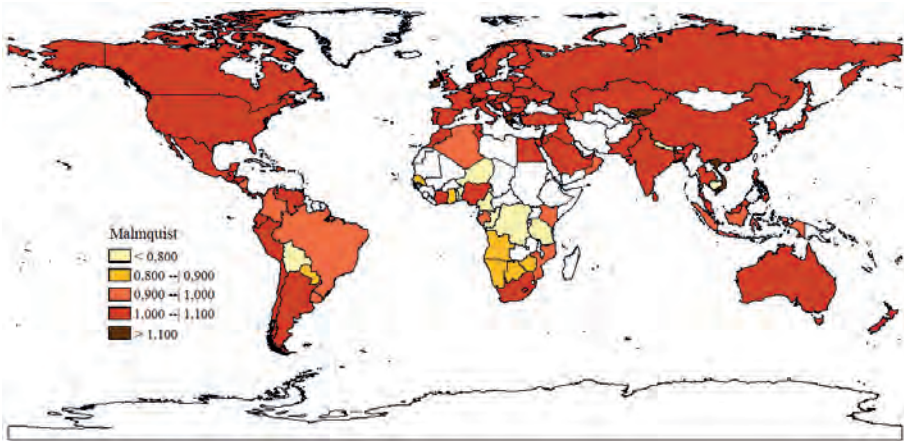
No período pesquisado neste trabalho (2006-2014), o índice de Malmquist médio, sob disposição natural foi de 0,931, indicando perda de eficiência unificada global. Tal redução deve-se, principalmente, ao período 2006-2008, que apresentou indicador médio de 0,938, justificado pelos problemas enfrentados em decorrência da crise econômica mundial, iniciada em 2007 e que se estendeu por todo o ano de 2008. O único período que apresentou ganhos de eficiência foi entre 2010 e

2012 (1,010). Já o país que apresentou maior ganho de eficiência, sob disposição natural, foi o Panamá, com ganho de 21,5% entre 2006 e 2014; enquanto a maior perda foi auferida pelo Cazaquistão (0,621 ou perda de 37,9%).

O Panamá é considerado um dos países mais competitivos da América Latina, possuindo boas infraestruturas de transporte, financeira e tecnológica, especialmente através de investimentos de empresas multinacionais estrangeiras estabelecidas no país (WEF, 2014). Entre 2006 e 2014, o PIB *per capita* panamenho foi superior à média latino-americana e caribenha, o PIB total mais que dobrou e o volume de emissões de CO<sub>2</sub> variou menos que 40% entre os anos analisados, corroborando os ganhos de eficiência auferidos nesse período. Em contrapartida, no Cazaquistão, a razão entre crescimento das emissões e evolução do PIB é muito superior ao caso do Panamá, principalmente pelo fato de a matriz energética do país ser baseada quase totalmente em combustíveis fósseis (carvão, gás natural e petróleo) e apenas 1,1% em energias renováveis. Ademais, o país apresenta baixos indicadores de inovação (WEF, 2014) que, conjugados com as outras características já mencionadas, justificam as consideráveis perdas de eficiência no período de 2006 a 2014.

Ao considerar o índice de Malmquist (2006-2014) dos países sob disposição gerencial (figura 2), observa-se que os ganhos de eficiência ( $IM_z^t > 1$ ), entre 2006 e 2014, são mais presentes nos países estudados, ao comparar com o modelo sob disposição natural. Esses ganhos apresentam-se em um período em que a questão ambiental está em evidência no cenário internacional, com o pleno vigor do Protocolo de Quioto (1997) e o Acordo Climático Global proposto na Conferência de Bali (2007). Tais acordos estabeleciam a implementação de financiamentos e fundos de investimentos em medidas ambientais e transferência de tecnologia entre nações, garantindo ganhos de ecotecnologias que podem ter influenciado os resultados do índice de Malmquist já no curto prazo. Todos os índices de Malmquist dos 109 países calculados sob disposição gerencial encontram-se resumidos na tabela A.2 do apêndice A.

FIGURA 2  
Índices de Malmquist dos 109 países sob disposição gerencial (2006-2014)



Elaboração dos autores.

Obs.: Ilustração reproduzida conforme o original (nota do Editorial).

O índice de Malmquist médio, sob disposição gerencial, indica estabilidade no período 2006-2014 (1,003). Essa ligeira estabilidade pode ser observada em todos os períodos (2006-2008: 0,996; 2008-2010: 0,986; 2012-2014: 0,986), com exceção do período entre 2010 e 2012, que apresentou indicador médio de 1,034.

O país que apresentou maior ganho de eficiência, sob disposição gerencial, entre 2006 e 2014, foi a Suíça (1,206 ou ganho de 20,6%), ao passo que a maior perda foi auferida pelo Congo (0,629 ou perda de 37,1%). A Suíça faz altos investimentos em pesquisa e desenvolvimento, possui centros de pesquisa conceituados e cooperados com o mercado, tornando-se um dos países que mais inovam no mundo. Tais fatores, aliados a um elevado nível de capital humano, garantem ganhos de produtividade, principalmente em setores de elevado valor agregado, definindo a Suíça como líder no Índice de Competitividade Global (WEF, 2014) durante todo o período compreendido neste estudo. Todas essas características, somadas a instituições sólidas e preocupadas com a sustentabilidade, projetam e justificam os ganhos de eficiência unificada da Suíça mensurados neste trabalho.

Já o Congo, um dos países com mais recursos naturais do continente africano, tem a sua economia baseada na agricultura, no petróleo e nos recursos florestais. Diante de problemas de escassez de água salubre, conflitos internos entre milícias armadas e dos altos índices de desigualdade socioeconômica, é complicada a gestão exploratória dos recursos naturais congolezes, principalmente os florestais. Tais fatores podem não ser observados ao realizar uma análise da eficiência em um dado período, mas refletem consideravelmente na evolução da eficiência do país ao longo dos anos, como pode ser observado nos resultados apresentados neste trabalho.

A análise temporal indica que parte considerável dos países alcançaram ganhos de eficiência em seus desempenhos econômico (45 países) e ambiental (79 países) no período de 2006 a 2014. Contudo, tais ganhos foram baixos, o que, somado às perdas significativas experimentadas pelos demais países, resultaram em perda de eficiência global sob disposição natural e estabilidade da eficiência global sob disposição gerencial. Dessa forma, os países devem analisar a existência de fatores conjunturais que possam estar impedindo ganhos de eficiência ao longo dos anos. Ademais, é papel dos fóruns globais o estabelecimento de estratégias que possam alavancar os ganhos de eficiência global, principalmente de caráter ambiental. A difusão de ecotecnologias para regiões mais pobres, por exemplo, pode ser uma alternativa interessante para o planejamento sustentável global.

De forma geral, os resultados evidenciam que, embora haja iniciativas pontuais voltadas à sustentabilidade produtiva e ambiental, o avanço da eficiência unificada global permanece limitado. A predominância de congestionamentos indesejáveis em contraste com a baixa ocorrência de congestionamentos desejáveis revela gargalos significativos na adoção e difusão de ecotecnologias, especialmente nos países com baixa produtividade energética e limitado investimento em capital fixo. A análise temporal reforça esse diagnóstico ao apontar estabilidade ou retrocesso na eficiência em muitos países, particularmente sob disposição natural.

Ainda que acordos internacionais e políticas de sustentabilidade tenham promovido avanços em determinadas nações, os dados mostram que os ganhos permanecem concentrados em países com maior capacidade de inovação e infraestrutura institucional consolidada. Esses resultados reforçam a necessidade de ações coordenadas – nacionais e globais – que promovam a transferência de tecnologias limpas e o fortalecimento das capacidades produtivas sustentáveis, como estratégia para enfrentar os desafios ambientais contemporâneos de forma mais equitativa e eficaz.

No caso brasileiro, em específico, os resultados revelam uma trajetória marcada por oscilações na eficiência unificada ao longo dos subperíodos analisados. Entre 2006 e 2008, o país apresentou desempenho superior sob a disposição gerencial (1,0253), contrastando com um índice inferior na disposição natural (0,9531). Esse comportamento sugere uma conjuntura favorável à expansão do vetor de entradas com ganhos simultâneos de desempenho ambiental, o que pode estar associado ao dinamismo econômico do período, à ampliação do investimento público e à atuação de instituições ambientais no controle de externalidades, especialmente no contexto amazônico. Além disso, a valorização internacional de agendas sustentáveis nesse intervalo reforçou incentivos à adoção de práticas produtivas mais limpas.

Essa dinâmica, no entanto, se inverte no biênio seguinte (2008-2010), quando o índice sob disposição natural atinge 1,0364, ao passo que o gerencial recua para

0,9684. Esse padrão sinaliza uma priorização da eficiência técnica em detrimento do desempenho ambiental unificado, possivelmente em resposta às estratégias anticíclicas, adotadas após a crise financeira global, centradas no estímulo à produção e ao consumo. Nos dois biênios seguintes (2010-2012 e 2012-2014), os índices se aproximaram da estagnação, com valores ligeiramente inferiores a 1, embora o resultado do último biênio da disposição gerencial (1,0007) supere marginalmente o da disposição natural (0,9963), sugerindo um pequeno avanço na incorporação de tecnologias com menor impacto ambiental.

No acumulado de 2006 a 2014, o Brasil apresentou desempenho inferior à fronteira de eficiência sob ambas as disposições, com destaque negativo para a gerencial (0,9432). Esses resultados refletem limitações estruturais para a consolidação de um padrão de desenvolvimento produtivo compatível com metas ambientais. A desaceleração econômica após 2011, a fragmentação institucional, o baixo investimento em inovação tecnológica e o aumento das incertezas políticas a partir de 2013 configuram um ambiente adverso à difusão de ecotecnologias e à coordenação intersetorial. Em contraste com países que avançaram na integração entre política industrial e sustentabilidade ambiental, como Alemanha, Coreia do Sul e China, o Brasil manteve uma trajetória marcada por descontinuidade estratégica e baixa articulação institucional, o que comprometeu seu desempenho relativo no período.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este estudo teve como objetivo principal avaliar a eficiência unificada de 109 países, considerando simultaneamente o desempenho econômico e ambiental, por meio da aplicação da metodologia DEA com extensões que incorporam *outputs* desejáveis e indesejáveis. A análise incluiu a identificação de possíveis congestionamentos nos processos produtivos sob duas perspectivas distintas – disposição natural e disposição gerencial –, além da avaliação da dinâmica temporal da eficiência no período de 2006 a 2014, com base no índice de Malmquist.

A principal contribuição original do trabalho reside na integração inédita dessas três dimensões – eficiência produtiva, ambiental e dinâmica temporal – em escala global, oferecendo uma estrutura metodológica robusta para mensuração da ecoeficiência nacional sob múltiplas disposições. Ao aplicar simultaneamente modelos DEA adaptados, análise de congestionamentos e o índice de Malmquist, o estudo amplia a fronteira empírica e analítica da literatura sobre sustentabilidade produtiva.

Os resultados indicaram a predominância do congestionamento indesejável na maior parte dos países analisados, sinalizando ineficiências associadas à emissão excessiva de poluentes. Em contrapartida, o congestionamento desejável – que

indica maior ecoeficiência, com redução simultânea de emissões e aumento de produtos – foi identificado em um número restrito de nações. Observou-se, ainda, que fatores como localização geográfica ou nível de desenvolvimento econômico não explicam diretamente a ocorrência de congestionamentos, sugerindo que as estruturas produtivas e o padrão de uso da energia são determinantes mais relevantes. Países com baixa produtividade energética e fraca relação entre capital fixo e consumo energético apresentaram maiores desafios nesse quesito, o que aponta para a necessidade de investimentos consistentes em ecotecnologias e em matrizes energéticas mais eficientes.

Do ponto de vista temporal, os resultados do índice de Malmquist revelaram estagnação na eficiência unificada ao longo do período analisado, mesmo com o aumento dos debates globais sobre mudanças climáticas. Perdas de eficiência foram mais frequentes em países africanos e asiáticos sob a disposição natural. Além disso, verificou-se uma associação entre perdas de eficiência e baixos níveis de inovação e competitividade global, evidenciando a importância de políticas que promovam infraestrutura sustentável e avanços tecnológicos.

Particularmente no caso brasileiro, observou-se a presença de congestionamento indesejável e ausência de congestionamento desejável, além de desempenho inferior à fronteira de eficiência sob ambas as disposições. Esses resultados indicam limitações estruturais para alcançar uma trajetória de desenvolvimento produtivo e ambientalmente eficiente, revelando uma baixa articulação entre política industrial e sustentabilidade. Tais achados reforçam a necessidade de medidas específicas de política pública voltadas à modernização da matriz produtiva, à promoção de ecotecnologias e à maior integração entre desempenho econômico e mitigação de impactos ambientais.

As contribuições do estudo são relevantes tanto no plano teórico quanto no prático. Do ponto de vista acadêmico, o trabalho avança na literatura ao aplicar a DEA em um contexto agregado internacional, introduzindo variáveis ambientais na mensuração da eficiência. Praticamente, os achados oferecem subsídios para a formulação de políticas públicas, sugerindo que o alcance da fronteira de eficiência por meio da adoção de ecotecnologias possa gerar benefícios econômicos e ambientais expressivos. Tais resultados reforçam o papel estratégico de investimentos em tecnologias limpas e inovação verde, sobretudo por parte das economias mais desenvolvidas, cuja liderança na difusão tecnológica é essencial para enfrentar os desafios das mudanças climáticas.

Contudo, o estudo apresenta algumas limitações. As análises foram realizadas com base em dados agregados por país, o que limita a identificação de especificidades setoriais ou regionais. Adicionalmente, a base de dados internacional apresentou lacunas e inconsistências que exigiram ajustes e exclusões, o que pode

afetar a comparabilidade entre países. O intervalo temporal restrito (2006-2014) também não permite capturar evoluções recentes no campo da sustentabilidade e da inovação ambiental.

Como proposta de pesquisas futuras, sugere-se a ampliação da série temporal analisada, bem como a realização de estudos em nível setorial e subnacional. Investigações que combinem a abordagem da DEA com outros métodos analíticos, como regressões espaciais ou modelos hierárquicos, podem oferecer *insights* mais detalhados sobre os determinantes da ecoeficiência. Além disso, análises que integrem dados sobre políticas públicas, incentivos à inovação e características institucionais podem aprofundar a compreensão sobre os fatores que impulsionam – ou dificultam – a transição para uma economia mais sustentável.

## REFERÊNCIAS

- BANKER, R. D.; ZHENG, Z. E.; NATARAJAN, R. DEA-based hypothesis tests for comparing two groups of decision making units. **European Journal of Operation Research**, v. 206, n. 1, p. 231-238, 2010. DOI: 10.1016/j.ejor.2010.01.027.
- CAIADO, R. G. G. *et al.* Towards sustainable development through the perspective of eco-efficiency: a systematic literature review. **Journal of Cleaner Production**, v. 165, p. 890-904, 2017. DOI: 10.1016/j.jclepro.2017.07.166.
- CHEN, L.; WANG, Y.-M.; WANG, L. Congestion measurement under different policy objectives: an analysis of Chinese industry. **Journal of Cleaner Production**, v. 112, parte 4, p. 2943-2952, 2016. DOI: 10.1016/j.jclepro.2015.09.064.
- CHISTOV, V.; ARAMBURU, N.; CARRILLO-HERMOSILLA, J. Open eco-innovation: a bibliometric review of emerging research. **Journal of Cleaner Production**, v. 311, p. 127627, 2021. DOI: 10.1016/j.jclepro.2021.127627.
- COELLI, T. J. *et al.* **An introduction to efficiency and productivity analysis**. 2. ed. Nova York: Springer, 2005. 349 p. DOI: 10.1007/b136381.
- COOPER, W. W. *et al.* Congestion: its identification and management with DEA. In: COOPER, W. W.; SEIFORD, L. M.; ZHU, J. (ed.). **Handbook on Data Envelopment Analysis**. 2. ed. Nova York: Spring, 2011. p. 173-193. DOI: 10.1007/978-1-4419-6151-8.
- COOPER, W. W.; SEIFORD, L. M.; ZHU, J. (ed.). **Handbook on Data Envelopment Analysis**. 2. ed. Nova York: Springer, 2011. 498 p. DOI: 10.1007/978-1-4419-6151-8.
- FABRIZI, A.; GUARINI, G.; MELICIANI, V. Green patents, regulatory policies and research network policies. **Research Policy**, v. 47, n. 6, p. 1018-1031, 2018. DOI: 10.1016/j.respol.2018.03.005.

- FARRELL, M. J. The measurement of productive efficiency. **Journal of the Royal Statistical Society**: series A, v. 120, n. 3, p. 253-290, 1957. DOI: 10.2307/2343100.
- FERNANDES, L. J. M.; FREITAS, L. S. de. Da produtividade à produtividade verde: reflexões sobre a evolução conceitual rumo à sustentabilidade. **Revista Espacios**, v. 35, n. 13, 2014.
- FERREIRA, C. M. C.; GOMES, A. P. **Introdução à análise envoltória de dados**: teoria, modelos e aplicações. 2. ed. Viçosa: Editora UFV, 2020. 392 p.
- GEORGESCU-ROEGEN, N. The entropy law and the economic process in retrospect. **Eastern Economic Journal**, v. 12, n. 1, p. 3-25, 1986.
- GHISETTI, C.; PONTONI, F. Investigating policy and R&D effects on environmental innovation: a meta-analysis. **Ecological Economics**, v. 118, p. 57-66, 2015. DOI: 10.1016/j.ecolecon.2015.07.009.
- GOTO, M.; OTSUKA, A.; SUEYOSHI, T. DEA (Data Envelopment Analysis) assessment of operational and environmental efficiencies on Japanese regional industries. **Energy**, v. 66, p. 535-549, 2014. DOI: 10.1016/j.energy.2013.12.020.
- HALICIOGLU, F. An econometric study of CO<sub>2</sub> emissions, energy consumption, income and foreign trade in Turkey. **Energy Policy**, v. 37, n. 3, p. 1156-1164, 2009. DOI: 10.1016/j.enpol.2008.11.012.
- HOJNIK, J.; RUZZIER, M. What drives eco-innovation? A review of an emerging literature. **Environmental Innovation and Societal Transitions**, v. 19, p. 31-41, 2016. DOI: 10.1016/j.eist.2015.09.006.
- JANAHI, N. A.; DURUGBO, C. M.; AL-JAYYOUSI, O. R. Eco-innovation strategy in manufacturing: a systematic review. **Cleaner Engineering and Technology**, v. 5, p. 100343, 2021. DOI: 10.1016/j.clet.2021.100343.
- JOLLANDS, N. Concepts of efficiency in ecological economics: Sisyphus and the decision maker. **Ecological Economics**, v. 56, n. 3, p. 359-372, 2006. DOI: 10.1016/j.ecolecon.2005.09.014.
- KEMP, R.; PEARSON, P. **Final report MEI project about measuring eco-innovation**. Maastricht: UM-MERIT, 2007. (Project n. 044513 – Measuring eco-innovation).
- KOELLER, P. *et al.* **EcoInovação**: revisitando o conceito. Rio de Janeiro: Ipea, 2020. (Texto para Discussão, n. 2556).
- KUOSMANEN, T.; KORTELAJINEN, M. Measuring eco-efficiency of production with data envelopment analysis. **Journal of Industrial Ecology**, v. 9, n. 4, p. 59-72, 2005. DOI: 10.1162/108819805775247846.

LEI, M. *et al.* DEA analysis of FDI attractiveness for sustainable development: evidence from Chinese provinces. **Decision Support Systems**, v. 56, p. 406-418, 2013. DOI: 10.1016/j.dss.2012.10.053

MARDANI, A. *et al.* A comprehensive review of Data Envelopment Analysis (DEA) approach in energy efficiency. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 70, p. 1298-1322, 2017. DOI: 10.1016/j.rser.2016.12.030.

MARDANI, A. *et al.* Data Envelopment Analysis in energy and environmental economics: an overview of the state-of-the-art and recent development trends. **Energies**, v. 11, n. 8 (2002), p. 1-21, 2018. DOI: 10.3390/en11082002.

MIRANDA, C. R.; KOELLER, P.; LUSTOSA, M. C. J. **EcoInovação no Brasil: o desempenho das empresas brasileiras no período 2000-2017**. Brasília: Ipea, 2023. (Texto para Discussão, n. 2892).

MOHANTY, R. P.; DESHMUKH, S. G. Managing green productivity: a case study. **Work Study**, v. 48, n. 5, p. 165-169, 1999. DOI: 10.1108/00438029910279402.

MOREIRA, H. M.; RIBEIRO, W. C. A China na ordem ambiental internacional das mudanças climáticas. **Estudos Avançados**, v. 30, n. 87, p. 213-233, 2016. DOI: 10.1590/S0103-40142016.30870013.

NEJAT, P. *et al.* A global review of energy consumption, CO<sub>2</sub> emissions and policy in the residential sector (with an overview of the top ten CO<sub>2</sub> emitting countries). **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 43, p. 843-862, 2015. DOI: 10.1016/j.rser.2014.11.066.

PALMER, K.; OATES, W. E.; PORTNEY, P. R. Tightening environmental standards: the benefit-cost or the no-cost paradigm. **Journal of Economic Perspectives**, v. 9, n. 4, p. 119-132, 1995. DOI: 10.1257/jep.9.4.119.

PORTER, M. E.; LINDE, C. van der. Toward a new conception of the environment competitiveness relationship. **Journal of Economic Perspectives**, v. 9, n. 4, p. 97-118, 1995. DOI: 10.1257/jep.9.4.97.

QUADRELLI, R.; PETERSON, S. The energy-climate challenge: recent trends in CO<sub>2</sub> emissions from fuel combustion. **Energy Policy**, v. 35, n. 11, p. 5938-5952, 2007. DOI: 10.1016/j.enpol.2007.07.001.

RAY, S. C. **Data Envelopment Analysis: theory and techniques for economics and operations research**. Cambridge, Estados Unidos: Cambridge University Press, 2004. 361 p.

RIPPLE, W. J. *et al.* World scientists' warning to humanity: a second notice. **BioScience**, v. 67, n. 12, p. 1026-1028, 2017. DOI: 10.1093/biosci/bix125.

SALLES, A. C. *et al.* Tecnologia da informação verde: um estudo sobre sua adoção nas organizações. **Revista de Administração Contemporânea**, v. 20, n. 1, p. 41-63, 2016. DOI: 10.1590/1982-7849rac20161887.

SANTOS, M. A. F. dos; SANTOS, E. C. dos; MAIA, M. de F. R. Produtividade e inovação ambiental: uma análise da indústria de transformação em Minas Gerais. **Revista Brasileira de Inovação**, v. 22, e023003, 2023. DOI: 10.20396/rbi.v22i00.8667755.

SIMPSON, R. D.; BRADFORD, R. L. Taxing variable cost: environmental regulation as industrial policy. **Journal of Environmental Economics and Management**, v. 30, n. 3, p. 282-300, 1996. DOI: 10.1006/jeeem.1996.0019.

SOUSA, M. C. S.; STOSIC, B. Jackstrapping DEA scores for robust efficiency measurement. *In*: ENCONTRO NACIONAL DE ECONOMETRIA, 20., 2003, Porto Seguro. **Anais [...]**. Rio de Janeiro: SBE, 2003.

SOUSA, M. C. S.; STOSIC, B. Technical efficiency of the Brazilian municipalities: correcting nonparametric frontier measurements for outliers. **Journal of Productivity Analysis**, v. 24, n. 2, p. 155-179, 2005. DOI: 10.1007/s11123-005-4702-4.

SUEYOSHI, T.; GOTO, M. Can environmental investment and expenditure enhance financial performance of US electric utility firms under the clean air act amendment of 1990? **Energy Policy**, v. 37, n. 11, p. 4819-4826, 2009. DOI: 10.1016/j.enpol.2009.06.038.

SUEYOSHI, T.; GOTO, M. Should the US Clean Air Act include CO<sub>2</sub> emission control? Examination by data envelopment analysis. **Energy Policy**, v. 38, n. 10, p. 5902-5911, 2010. DOI: 10.1016/j.enpol.2010.05.044.

SUEYOSHI, T.; GOTO, M. Operational synergy in the electric utility industry under the influence of US deregulation policy: a linkage to financial performance and corporate value. **Energy Policy**, v. 39, n. 2, p. 699-713, 2011a. DOI: 10.1016/j.enpol.2010.10.043.

SUEYOSHI, T.; GOTO, M. DEA approach for unified efficiency measurement: assessment of Japanese fossil fuel power generation. **Energy Economics**, v. 33, n. 2, p. 292-303, 2011b. DOI: 10.1016/j.eneco.2010.07.008.

SUEYOSHI, T.; GOTO, M. Data envelopment analysis for environmental assessment: comparison between public and private ownership in petroleum industry. **European Journal of Operational Research**, v. 216, n. 3, p. 668-678, 2012a. DOI: 10.1016/j.ejor.2011.07.046.

SUEYOSHI, T.; GOTO, M. DEA radial measurement for environmental assessment and planning: desirable procedures to evaluate fossil fuel power plants. **Energy Policy**, v. 41, p. 422-432, 2012b. DOI: 10.1016/j.enpol.2011.11.003.

SUEYOSHI, T.; GOTO, M. Returns to scale and damages to scale under natural and managerial disposability: strategy, efficiency and competitiveness of petroleum firms. **Energy Economics**, v. 34, n. 3, p. 645-662, 2012c. DOI: 10.1016/j.eneco.2011.07.003.

SUEYOSHI, T.; GOTO, M. Environmental assessment by DEA radial measurement: U.S. coal-fired power plants in ISO (Independent System Operator) and RTO (Regional Transmission Organization). **Energy Economics**, v. 34, n. 3, p. 663-676, 2012d. DOI: 10.1016/j.eneco.2011.08.016.

SUEYOSHI, T.; GOTO, M. DEA environmental assessment of coal fired power plants: methodological comparison between radial and non-radial models. **Energy Economics**, v. 34, n. 6, p. 1854-1863, 2012e. DOI: 10.1016/j.eneco.2012.07.008.

SUEYOSHI, T.; GOTO, M. Weak and strong disposability *vs.* natural and managerial disposability in DEA environmental assessment: comparison between Japanese electric power industry and manufacturing industries. **Energy Economics**, v. 34, n. 3, p. 686-699, 2012f. DOI: 10.1016/j.eneco.2011.10.018.

SUEYOSHI, T.; GOTO, M. DEA environmental assessment in a time horizon: Malmquist index on fuel mix, electricity and CO<sub>2</sub> of industrial nations. **Energy Economics**, v. 40, p. 370-382, 2013a. DOI: 10.1016/j.eneco.2013.07.013.

SUEYOSHI, T.; GOTO, M. Pitfalls and remedies in DEA applications: how to handle an occurrence of zero in multipliers by strong complementary slackness conditions. **Engineering**, v. 5, n. 5, p. 29-34, 2013b. DOI: 10.4236/eng.2013.55A005.

SUEYOSHI, T.; GOTO, M. Environmental assessment on coal-fired power plants in U.S. north-east region by DEA non-radial measurement. **Energy Economics**, v. 50, p. 125-139, 2015a. DOI: 10.1016/j.eneco.2015.04.016.

SUEYOSHI, T.; GOTO, M. DEA environmental assessment in time horizon: radial approach for Malmquist index measurement on petroleum companies. **Energy Economics**, v. 51, p. 329-345, 2015b. DOI: 10.1016/j.eneco.2015.07.010.

SUEYOSHI, T.; GOTO, M. Japanese fuel mix strategy after disaster of Fukushima Daiichi nuclear power plant: lessons from international comparison among industrial nations measured by DEA environmental assessment in time horizon. **Energy Economics**, v. 52, parte A, p. 87-103, 2015c. DOI: 10.1016/j.eneco.2015.09.001.

SUEYOSHI, T.; GOTO, M. Undesirable congestion under natural disposability and desirable congestion under managerial disposability in U.S. electric power industry measured by DEA environmental assessment. **Energy Economics**, v. 55, p. 173-188, 2016. DOI: 10.1016/j.eneco.2016.01.004.

- SUEYOSHI, T.; GOTO, M. **Environmental assessment on energy and sustainability by data envelopment analysis**. Oxford: John Wiley & Sons, 2018. 700 p.
- SUEYOSHI, T.; GOTO, M.; SUGIYAMA, M. DEA window analysis for environmental assessment in a dynamic time shift: performance assessment of U.S. coal-fired power plants. **Energy Economics**, v. 40, p. 845-857, 2013. DOI: 10.1016/j.eneco.2013.09.020.
- SUEYOSHI, T.; GOTO, M.; WANG, D. Malmquist index measurement for sustainability enhancement in Chinese municipalities and provinces. **Energy Economics**, v. 67, p. 554-571, 2017. DOI: 10.1016/j.eneco.2017.08.026.
- SUEYOSHI, T.; LI, A.; GAO, Y. Sector sustainability on fossil fuel power plants across Chinese provinces: methodological comparison among radial, non-radial and intermediate approaches under group heterogeneity. **Journal of Cleaner Production**, v. 187, p. 819-829, 2018. DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.03.216.
- SUEYOSHI, T.; WANG, D. DEA environmental assessment on US petroleum industry: non-radial approach with translation invariance in time horizon. **Energy Economics**, v. 72, p. 276-289, 2018. DOI: 10.1016/j.eneco.2018.02.003.
- SUEYOSHI, T.; YUAN, Y. Returns to damage under undesirable congestion and damages to return under desirable congestion measured by DEA environmental assessment with multiplier restriction: economic and energy planning for social sustainability in China. **Energy Economics**, v. 56, p. 288-309, 2016a. DOI: 10.1016/j.eneco.2016.02.014.
- SUEYOSHI, T.; YUAN, Y. Marginal rate of transformation and rate of substitution measured by DEA environmental assessment: comparison among European and North American nations. **Energy Economics**, v. 56, p. 270-287, 2016b. DOI: 10.1016/j.eneco.2016.01.017.
- SUEYOSHI, T.; YUAN, Y. Social sustainability measured by intermediate approach for DEA environmental assessment: Chinese regional planning for economic development and pollution prevention. **Energy Economics**, v. 66, p. 154-166, 2017. DOI: 10.1016/j.eneco.2017.06.008.
- SUEYOSHI, T.; YUAN, Y. Measuring energy usage and sustainability development in Asian nations by DEA intermediate approach. **Journal of Economic Structures**, v. 7, n. 6, p. 1-18, 2018. DOI: 10.1186/s40008-017-0100-0.
- SUEYOSHI, T.; YUAN, Y.; GOTO, M. A literature study for DEA applied to energy and environment. **Energy Economics**, v. 62, p. 104-124, 2017. DOI: 10.1016/j.eneco.2016.11.006.

VITAL, M. H. F. Aquecimento global: acordos internacionais, emissões de CO<sub>2</sub> e o surgimento dos mercados de carbono no mundo. **BNDES Setorial**, v. 24, n. 48, p. 167-244, 2018.

WBCSD – WORLD BUSINESS COUNCIL FOR SUSTAINABLE DEVELOPMENT. **A eco-eficiência: criar mais valor com menos impacto**. Lisboa: WBCSD, 2000. 36 p.

WEF – WORLD ECONOMIC FORUM. **The global competitiveness report 2014-2015**. Geneva: WEF, 2014. 549 p.

WU, J. *et al.* Congestion measurement for regional industries in China: a data envelopment analysis approach with undesirable outputs. **Energy Policy**, v. 57, p. 7-13, 2013. DOI: 10.1016/j.enpol.2012.02.062.

WU, F.; ZHOU, P.; ZHOU, D. Q. Measuring energy congestion in Chinese industrial sectors: a slacks-based DEA approach. **Computational Economics**, v. 46, n. 3, p. 479-494, 2015. DOI: 10.1007/s10614-015-9499-2.

ZHOU, H. *et al.* Data envelopment analysis application in sustainability: the origins, development and future directions. **European Journal of Operational Research**, v. 264, n. 1, p. 1-16, 2018. DOI: 10.1016/j.ejor.2017.06.023.

ZHOU, P.; ANG, B. W.; HAN, J. Y. Total factor carbon emission performance: a Malmquist index analysis. **Energy Economics**, v. 32, n. 1, p. 194-201, 2010. DOI: 10.1016/j.eneco.2009.10.003.

## APÊNDICE A

QUADRO A.1  
**Resultados das presenças de congestionamento indesejável e congestionamento desejável**

Pais	UC	DC	Pais	UC	DC	Pais	UC	DC	Pais	UC	DC	UC	DC
África do Sul	Forte	Forte	Chipre	-	-	Índia	Forte	-	Peru	Forte	-	Forte	-
Albânia	-	-	Colômbia	Forte	-	Indonésia	Forte	-	Polónia	Forte	-	Forte	-
Alemanha	-	-	Congo	Forte	-	Iraque	Forte	-	Portugal	Forte	-	Forte	-
Angola	Forte	-	Coreia do Sul	Forte	Forte	Irlanda	Forte	-	Quênia	Forte	-	Forte	-
Arábia Saudita	-	-	Costa do Marfim	-	Forte	Israel	Forte	-	Quirguistão	Forte	-	Forte	Forte
Argélia	-	-	Costa Rica	-	-	Itália	Forte	-	Reino Unido	Forte	-	Forte	-
Argentina	Forte	-	Croácia	-	-	Jamaica	Forte	-	República Democrática do Congo	Forte	-	Forte	-
Armênia	Forte	-	Dinamarca	Forte	-	Japão	Forte	-	República Dominicana	Forte	-	Forte	-
Austrália	Forte	Forte	Egito	Forte	-	Jordânia	Forte	-	Romênia	Forte	-	Forte	-
Áustria	-	-	El Salvador	Forte	-	Lituânia	-	-	Rússia	Forte	-	Forte	-
Azerbaijão	-	-	Emirados Árabes Unidos	Forte	-	Luxemburgo	-	-	Senegal	Forte	-	Forte	-
Bahrain	Forte	Forte	Equador	Forte	-	Macedônia	Forte	-	Sri Lanka	Forte	-	Forte	-
Bangladesh	Forte	-	Eslôvaquia	Forte	-	Malásia	Forte	-	Suécia	Forte	-	Forte	-
Belarus	Forte	-	Eslôvênia	-	-	Marrocos	Forte	-	Suíça	Forte	-	Forte	-
Bélgica	Forte	-	Espanha	Forte	-	México	-	-	Taiândia	Forte	-	Forte	-

(Continua)

(Continuação)

País	UC	DC	País	UC	DC	País	UC	DC	País	UC	DC
Benin	Forte	-	Estados Unidos	Forte	-	Moçambique	Forte	Forte	Tajiquistão	Forte	-
Bolívia	Forte	-	Estônia	Forte	Forte	Moldávia	-	Forte	Tanzânia	Forte	Fraca
Bósnia e Herzegovina	Forte	Forte	Filipinas	Forte	-	Namíbia	Forte	-	Togo	-	Forte
Botsuana	Forte	-	Finlândia	-	Forte	Nepal	Forte	Forte	Tunísia	Forte	-
Brasil	Forte	-	França	-	-	Nicarágua	-	-	Turquia	Forte	-
Brunei	Forte	-	Gabão	Forte	Forte	Niger	Forte	-	Ucrânia	Forte	Forte
Bulgária	Forte	-	Gana	Forte	Forte	Nigéria	Forte	-	Uruguai	Forte	-
Camarões	Forte	-	Geórgia	-	Forte	Noruega	Forte	-	Venezuela	-	-
Camboja	Forte	-	Grécia	Forte	-	Nova Zelândia	Forte	-	Vietnã	Forte	-
Canadá	Forte	Forte	Guatemala	Forte	-	Oma	-	Forte	Zimbábue	Forte	Forte
Cazaquistão	Forte	-	Holanda	Forte	-	Panamá	-	-			
Chile	-	-	Honduras	-	-	Paquistão	Forte	-			
China	Forte	Fraca	Hungria	Forte	-	Paraguai	Forte	-			

Elaboração dos autores.

Obs.: UC – congestionamento indesejável; e DC – congestionamento desejável.

**TABELA A.1**  
**Índice de Malmquist dos países, em diferentes períodos, sob disposição natural**

País	2006-2008	2008-2010	2010-2012	2012-2014	2006-2014	País	2006-2008	2008-2010	2010-2012	2012-2014	2006-2014
África do Sul	0,8291	0,9922	1,0555	1,0477	0,8814	Hungria	0,9227	1,1155	1,0550	0,9843	1,0750
Albânia	1,0255	1,0277	1,0237	1,0121	1,0108	Índia	0,8599	0,8800	0,9349	1,0071	0,7125
Alemanha	0,9596	1,0729	1,0293	1,0091	1,0563	Indonésia	0,8864	0,9686	1,0614	0,9863	0,9123
Angola	1,0188	1,0227	1,0557	1,0039	1,0532	Iraque	0,8943	0,9306	1,0020	0,9163	0,8369
Arábia Saudita	0,9119	0,9513	0,9752	0,9516	0,8049	Irlanda	1,0205	1,0577	1,0583	0,9956	1,0968
Argélia	0,9458	0,9711	1,0289	0,9789	0,9018	Israel	0,8912	1,1111	1,0541	0,9770	1,0638
Argentina	0,9445	1,0158	1,0332	0,9888	0,9618	Itália	1,0010	1,0478	1,0416	0,9955	1,0759
Armênia	1,0200	1,0277	0,9446	0,9677	0,8948	Jamaica	0,9088	1,0702	0,8520	0,9709	0,9224
Austrália	0,9476	0,9988	0,9903	1,0574	1,0238	Japão	0,9731	1,0299	1,0394	1,0650	1,0523
Áustria	0,9954	1,0321	1,0357	1,0116	1,0615	Jordânia	0,8420	1,0808	1,0101	1,0096	0,9282
Azerbaijão	0,9143	0,9533	0,9823	1,0019	0,9135	Lituânia	0,9196	1,1753	1,0197	0,9864	1,1188
Bahrain	0,7968	0,9656	0,9894	0,9958	0,7304	Luxemburgo	0,9672	1,0489	0,9355	1,1279	1,0614
Bangladesh	0,8963	0,8755	0,9112	0,9988	0,8089	Macedônia	0,8857	1,0009	0,9934	1,0341	0,9193
Belarus	0,8807	1,1462	1,0750	0,9920	1,0370	Malásia	0,9240	0,9564	1,0401	0,9559	0,8807
Bélgica	1,0237	1,0620	1,2160	0,7926	0,8786	Marrocos	1,0704	1,0406	1,0726	0,9947	1,1322
Benin	0,8406	0,7545	0,9714	0,8899	0,6364	México	0,9094	1,0133	1,0500	0,9840	0,9461
Bolívia	0,8740	1,0004	0,9556	0,9689	0,7922	Moçambique	0,9420	0,8876	0,9630	0,9427	0,7910
Bósnia e Herzegovina	0,7847	1,0708	0,9678	1,0123	0,8079	Moldávia	0,8807	0,9864	0,9215	0,9983	0,6894
Botsuana	0,9399	1,0153	1,0035	1,0045	0,9881	Namíbia	0,9571	1,0377	1,0058	0,9815	1,0230
Brasil	0,9531	1,0364	0,9904	0,9963	0,9719	Nepal	0,9129	0,8518	1,0101	0,9121	0,7100
Brunel	0,8932	0,8650	0,8638	1,0161	0,6887	Nicarágua	0,9926	0,8692	0,9369	0,9368	0,7784
Bulgária	0,9037	1,0856	1,0178	1,0613	0,9914	Niger	0,9551	0,9343	0,9765	0,9521	0,8602
Camarões	0,9764	0,9900	0,9697	0,9390	0,8861	Nigéria	1,0437	0,9066	0,9704	0,9681	0,9168
Cambaja	0,9718	0,9301	0,9961	0,9257	0,7596	Noruega	1,0048	0,9757	1,0126	1,0122	1,0168
Canadá	0,9328	1,0682	1,0396	1,0384	1,0732	Nova Zelândia	0,9670	1,0584	1,0462	1,0249	1,1081
Cazaquistão	0,8570	0,8774	1,0254	0,8833	0,6214	Omã	0,8978	0,9582	0,9774	0,9686	0,7991
Chile	0,9229	0,9879	1,0471	0,9960	0,9507	Panamá	1,0038	0,9418	1,0339	1,2355	1,2150

(Continua)

(Continuação)

País	2006-2008	2008-2010	2010-2012	2012-2014	2006-2014	País	2006-2008	2008-2010	2010-2012	2012-2014	2006-2014
China	0,9716	1,0215	1,1070	0,9883	1,0054	Paquistão	0,9921	1,0764	0,9651	1,0142	1,0373
Chipe	0,9625	0,9503	1,0697	1,0672	1,0433	Paraguai	0,9699	1,0176	0,9823	0,9571	0,8945
Colômbia	1,0500	0,9995	0,9841	1,1033	1,1037	Peru	0,9979	1,0128	0,9708	1,0613	1,0051
Congo	0,9602	0,9500	0,9762	0,9562	0,8719	Polónia	0,8507	1,1350	1,0830	1,0617	1,0890
Coreia do Sul	1,0146	0,9499	1,0799	0,9506	1,0158	Portugal	0,9649	1,0544	1,0605	1,0106	1,0798
Costa do Marfim	0,8960	0,9380	0,9793	0,9449	0,8133	Quênia	0,9454	0,8786	0,9554	0,9408	0,8190
Costa Rica	0,9678	1,0044	1,0476	0,9941	1,0197	Quirguistão	0,7932	0,8839	0,9545	1,0092	0,7300
Cróacia	0,9548	1,0885	1,0671	1,0078	1,0678	Reino Unido	0,9696	1,0623	1,0490	0,9853	1,0437
Dinamarca	1,0399	1,0129	1,0290	1,0116	1,0641	República Democrática do Congo	0,9806	0,8853	1,0444	0,8133	0,7524
Egito	0,8591	0,9648	1,0324	1,0535	0,9564	República Dominicana	1,0119	1,0155	1,0360	1,0286	1,0806
El Salvador	0,9793	0,8841	0,9359	0,9909	0,7633	Romênia	0,9297	1,0597	1,0687	1,0022	1,0341
Emirados Árabes Unidos	0,8484	0,9734	0,9822	0,9889	0,7919	Rússia	0,8794	0,9394	1,0255	0,9549	0,7150
Equador	1,0272	1,0005	1,0561	1,0017	1,0231	Senegal	0,8297	0,9152	0,8951	0,9571	0,7183
Eslôvaquia	0,9411	1,1236	1,0939	1,0313	1,1296	Sri Lanka	1,0102	0,9074	1,0228	1,0113	0,9214
Eslôvenia	0,9707	1,0884	1,1327	1,0139	1,1411	Suécia	1,0201	0,9981	1,0209	1,0014	1,0366
Espanha	0,9958	1,0312	1,0534	0,9956	1,0904	Suíça	1,0970	0,9620	1,1114	0,9399	1,0827
Estados Unidos	0,8759	1,0750	0,9916	1,0307	0,9733	Taiilândia	0,9326	0,9783	0,9977	1,0201	0,9065
Estónia	0,8263	1,2396	1,1003	1,0595	1,0677	Taijuistão	0,8004	0,7852	0,9583	0,9180	0,6837
Filipinas	0,8968	0,8960	0,9340	1,0117	0,8414	Tanzânia	0,9700	0,9713	0,9784	0,9421	0,8612
Finlândia	0,9820	1,0445	1,0420	1,0134	1,0888	Togo	0,8151	0,8898	0,9725	0,8535	0,6233
França	0,9686	1,0474	1,0314	1,0262	1,0694	Tunísia	0,9272	0,9987	1,0117	1,0042	0,9384
Gabão	0,8190	1,0122	1,0045	1,0145	0,8453	Turquia	0,9635	1,0464	1,0751	1,0067	1,0855
Gama	0,9635	0,9640	0,9265	0,9579	0,8454	Ucrânia	0,8368	0,9899	0,9723	1,0362	0,9169
Geórgia	1,0064	0,8754	0,9293	0,9958	0,7663	Uruguai	0,9224	1,0374	1,0028	0,9979	0,9881
Grécia	1,0032	1,0753	1,0754	1,0562	1,1254	Venezuela	0,8886	1,1131	1,0924	0,9844	0,9849
Guatemala	0,9959	0,9321	0,9783	0,9728	0,8477	Vietnã	0,8324	0,8549	0,9600	0,9964	0,7415
Holanda	0,9783	1,0380	1,0296	0,9743	1,0202	Zimbábue	0,8812	0,6707	0,9833	0,9783	0,6936
Honduras	1,0422	0,9456	0,9092	0,9332	0,8015						

Elaboração dos autores.

**TABELA A.2**  
**Índice de Malmquist dos países, em diferentes períodos, sob disposição gerencial**

País	2006-2008	2008-2010	2010-2012	2012-2014	2006-2014	País	2006-2008	2008-2010	2010-2012	2012-2014	2006-2014
África do Sul	1,0117	1,0071	1,0901	0,9478	1,0594	Hungria	1,0018	0,9969	1,0741	0,9845	1,0644
Albânia	1,0207	1,0176	1,0159	0,9964	1,0516	Índia	0,9835	1,0180	1,0729	0,9991	1,0778
Alemanha	0,9976	0,9929	1,0694	0,9792	1,0464	Indonésia	1,0018	1,0042	1,0532	0,9861	0,9524
Angola	1,0791	0,9277	0,9590	0,9238	0,8514	Iraque	1,0381	0,9897	1,0494	0,9717	1,0282
Arábia Saudita	1,0305	0,9882	1,0546	0,9420	1,0143	Irlanda	1,0789	1,0197	1,0350	1,0179	1,1583
Argélia	1,0457	0,9816	1,0171	0,9728	0,9947	Israel	0,9967	0,9942	1,0736	0,9786	1,0519
Argentina	1,0095	1,0067	1,0252	1,0200	1,0575	Itália	1,0067	0,9937	1,0638	1,0033	1,0900
Armênia	0,9960	0,9909	1,0231	1,0133	1,0544	Jamaica	0,9871	1,0032	1,0246	1,0127	1,0497
Austrália	1,0331	1,0077	1,0554	1,0256	1,0876	Japão	0,9984	0,9929	1,0718	0,9768	1,0353
Áustria	1,0123	0,9931	1,0628	1,0087	1,0727	Jordânia	0,9909	1,0018	1,0742	0,9781	1,0412
Azerbaijão	1,0398	0,9565	0,9501	0,9545	0,9742	Litânia	1,0186	0,9840	1,0220	1,0124	1,0496
Bahrain	1,0078	1,0055	1,0822	0,9407	1,0305	Luxemburgo	0,9947	0,9928	1,0687	0,9849	1,0599
Bangladesh	0,9799	1,0273	1,0606	1,0193	1,0411	Macedônia	0,9895	1,0057	1,0743	0,9956	1,0632
Belarus	1,0164	0,9670	1,0809	1,0226	1,0780	Malásia	1,0144	0,9886	1,0665	0,9682	1,0363
Bélgica	1,0097	0,9905	1,0749	0,9760	1,0569	Marrocos	0,9741	1,0230	1,0604	0,9920	1,0473
Benin	0,9032	0,8700	0,9276	0,9431	0,7401	México	0,9989	0,9992	1,0666	0,9839	1,0449
Bolívia	0,9393	0,9278	0,9488	0,9694	0,7368	Mocambique	1,0029	0,9572	1,0532	0,9209	0,9208
Bósnia e Herzegovina	0,9892	1,0035	1,0907	0,9628	1,0590	Moldávia	0,9917	0,9668	1,0762	1,0269	1,0596
Botsuana	0,9494	0,8810	0,9874	0,9906	0,8227	Namíbia	0,9428	0,9089	0,9856	0,9984	0,8609
Brasil	1,0253	0,9684	0,9797	1,0007	0,9432	Nepal	0,8882	0,8723	0,9002	0,9504	0,7001
Brunei	1,0216	0,9737	0,9944	0,9751	0,9307	Nicarágua	0,9966	0,9783	0,9662	0,9981	0,9464
Bulgária	1,0078	0,9900	1,0793	0,9989	1,0792	Níger	1,0660	0,9041	0,8697	1,0473	0,7961
Camarões	0,9418	0,8955	0,9440	0,9771	0,7949	Nigéria	0,9819	1,0420	1,0518	0,9953	1,0412
Cambóia	0,9061	0,8943	0,9332	0,9530	0,7174	Noruega	1,0483	0,9661	1,0753	0,9620	1,0374
Canadá	1,0172	0,9827	1,0844	1,0240	1,0804	Nova Zelândia	1,0166	0,9882	1,0290	1,0298	1,0528
Cazaquistão	1,0117	0,9844	1,0673	0,9667	1,0036	Omã	1,0402	0,9797	1,0307	0,9429	0,9924
Chile	1,0331	0,9828	1,0184	0,9877	1,0127	Panamá	1,0252	1,0213	1,0415	1,0099	1,0959
China	1,0119	1,0175	1,0909	0,9747	1,0956	Paquistão	0,9865	0,9992	1,0296	1,0121	1,0398

(Continua)

(Continuação)

País	2006-2008	2008-2010	2010-2012	2012-2014	2006-2014	País	2006-2008	2008-2010	2010-2012	2012-2014	2006-2014
Chipe	1,0041	0,9994	1,0690	0,9850	1,0567	Paraguai	0,9290	0,9275	0,9748	0,9924	0,8434
Colômbia	1,0352	1,0044	0,9754	0,9847	0,9949	Peru	0,9843	1,0183	1,0390	0,9997	1,0275
Congo	0,7605	1,0614	0,8574	0,9242	0,6292	Polônia	0,9983	0,9971	1,0803	0,9800	1,0708
Coreia do Sul	1,0131	0,9903	1,0837	0,9534	1,0475	Portugal	1,0056	1,0001	1,0535	1,0234	1,0871
Costa do Marfim	0,9692	0,9848	1,0092	1,0602	1,0502	Quênia	0,9594	0,9862	1,0306	1,0276	0,9878
Costa Rica	0,9757	1,0102	1,0569	0,9881	1,0291	Quirguistão	1,0117	1,0261	1,0846	1,0174	1,1530
Cróacia	1,0134	0,9986	1,0546	1,0296	1,0648	Reino Unido	0,9999	0,9927	1,0642	0,9839	1,0667
Dinamarca	1,0313	0,9985	1,0533	1,0171	1,0864	República Democrática do Congo	1,0088	1,3262	0,9509	0,7388	0,7863
Egito	1,0064	1,0002	1,0594	0,9909	1,0458	República Dominicana	0,9676	1,0183	1,0582	1,0023	1,0620
El Salvador	0,9856	1,0138	1,0681	0,9969	1,0530	Romênia	1,0005	1,0010	1,0689	1,0048	1,0670
Emirados Árabes Unidos	1,0099	0,9880	1,0630	0,9656	1,0275	Rússia	1,0074	0,9903	1,0780	0,9698	1,0397
Equador	1,0089	1,0110	1,0505	0,9942	1,0132	Senegal	0,9354	0,9343	0,9505	0,9677	0,8222
Eslôvaquia	1,0083	0,9955	1,0791	0,9891	1,0718	Sri Lanka	0,9871	1,0158	1,0115	0,9897	1,0159
Eslôvenia	1,0070	0,9943	1,0805	0,9982	1,0670	Suécia	1,0334	0,9673	1,0914	0,9906	1,0834
Espanha	0,9988	0,9965	1,0688	0,9918	1,0671	Suíça	1,0477	1,0350	1,0847	1,0165	1,2063
Estados Unidos	1,0104	0,9908	1,0792	0,9654	1,0421	Taiilândia	0,9845	1,0080	1,0733	0,9758	1,0432
Estônia	1,0112	0,9931	1,0923	0,9610	1,0558	Taiquistão	0,9710	0,9265	0,9405	0,9854	0,9209
Filipinas	0,9852	1,0209	1,0536	1,0047	1,0061	Tanzânia	0,9724	0,9287	0,9372	0,9345	0,7359
Finlândia	1,0100	0,9883	1,0895	0,9660	1,0510	Togo	0,8095	0,8807	0,8791	0,9846	0,6458
França	1,0231	0,9858	1,0626	1,0141	1,0643	Tunísia	0,9967	1,0024	1,0632	0,9870	1,0439
Gabão	0,9726	0,9137	0,9721	0,9843	0,9063	Turquia	1,0296	1,0053	1,0727	0,9920	1,0819
Gana	0,9159	0,8984	0,9031	0,9738	0,8381	Ucrânia	1,0090	1,0122	1,0960	0,9807	1,0780
Geórgia	0,9891	1,0038	1,0590	0,9913	1,0666	Uruguai	1,0032	0,9815	0,9873	1,0069	0,9634
Grécia	1,0134	1,0018	1,0762	0,9922	1,1009	Venezuela	1,0356	0,9944	1,0829	0,9810	1,0681
Guatemala	1,0116	1,0036	1,0123	0,9992	1,0595	Vietnã	0,9860	1,0225	1,0768	1,0173	1,1018
Holanda	1,0001	0,9923	1,0684	0,9747	1,0335	Zimbábue	0,9497	0,7806	0,8851	0,9975	0,8617
Honduras	0,9886	0,9939	1,0328	1,0104	1,0678						

Elaboração dos autores.

Originais submetidos em: mar. 2025.

Última versão recebida em: ago. 2025.

Aprovada em: ago. 2025.