

# EFEITOS DE VARIÁVEIS CLIMÁTICAS SOBRE A EFICIÊNCIA TÉCNICA DOS COMPLEXOS PORTUÁRIOS BRASILEIROS

William Barros Miranda<sup>1</sup>  
Tician Grecco Zanon Moura<sup>2</sup>  
Márcio Nora Barbosa<sup>3</sup>  
Alisson Talys Geraldo Fiorentin<sup>4</sup>

## RESUMO

Eventos climáticos extremos têm se tornado mais frequentes e intensos, afetando diretamente setores estratégicos como a infraestrutura portuária. Dada a relevância dos portos na economia global, preocupa sua alta vulnerabilidade a fenômenos que comprometem suas manobras de atracação, operações de carga e navegação, impactando a produtividade. Apesar dessa relação, observa-se uma lacuna na literatura sobre os efeitos das variáveis climáticas na eficiência técnica dos portos brasileiros. Este estudo investiga a resiliência operacional diante de condições climáticas adversas nos portos de Itaguaí, Itajaí, Itaquí, Paranaguá-Antonina, Rio Grande, Santos, São Francisco do Sul e Vitória, que juntos respondem por mais de 70% do comércio exterior do país. A análise utiliza a metodologia de Fronteira Estocástica (SFA) para estimar os impactos do clima, incluindo vento, rajadas, precipitação, temperatura e umidade, sobre a eficiência técnica desses complexos portuários no período de 2020 a 2024, os principais resultados encontrados evidenciam que as variáveis climáticas estão associadas a perdas de eficiência técnica e ao aumento na variância da ineficiência, indicando maior vulnerabilidade operacional sob condições ambientais extremas.

**Palavras-chave:** Portos; Eficiência técnica; Variáveis Climáticas.

## ABSTRACT

Extreme weather events have become increasingly frequent and intense, directly affecting strategic sectors such as port infrastructure. Given the importance of ports to the global economy, their high vulnerability to natural phenomena that disrupt docking maneuvers, cargo handling, and navigation raises concerns, as these conditions negatively impact productivity. Despite this relationship, there is a notable gap in the literature regarding the effects of climatic variables on the technical efficiency of Brazilian ports. This study investigates operational resilience under adverse climatic conditions in the ports of Itaguaí, Itajaí, Itaquí, Paranaguá-Antonina, Rio Grande, Santos, São Francisco do Sul and Vitória, which together accounted for over 70% of the country's foreign trade. The analysis applies the Stochastic Frontier Analysis (SFA)

<sup>1</sup> Doutorando no Programa de Pós-Graduação em Economia Regional e Políticas Públicas (PERPP) da Universidade Estadual de Santa Cruz, com bolsa concedida pela Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado da Bahia (FAPESB). Membro externo vinculado ao Grupo de Pesquisa em Economia Azul (GPEA/FURG). Email: wbmiranda.perpp@uesc.br.

<sup>2</sup> Doutora em Economia no programa Instrumentos de Análise Econômica na Universidade de Oviedo, Espanha. Professora do PERPP/UESC. Membro Externo vinculado ao Grupo de Pesquisa em Economia Azul (GPEA/FURG). Email: tgzmoura@uesc.br.

<sup>3</sup> Doutor em Economia Internacional pela Universidade do Vale do Rio dos Sinos, Brasil. Professor do ICEAC/FURG. Atua no Grupo de Pesquisa em Economia Azul (GPEA/FURG). Email: marciorabarbosa@gmail.com.

<sup>4</sup> Mestrando no Programa de Pós Graduação em Economia Aplicada (PPGE/FURG). Atua no Grupo de Pesquisa em Economia Azul (GPEA/FURG). Email: alisson.fiorentin@outlook.com.

methodology to estimate the impacts of climate, including wind, gusts, precipitation, temperature, and humidity, on the technical efficiency of these port complexes from 2020 to 2024, the main findings indicate that climatic variables are associated with losses in technical efficiency and increases in the variance of inefficiency, suggesting greater operational vulnerability under extreme environmental conditions.

**Keywords:** Ports; Technical Efficiency; Climate Variables.

**Área 6** – Infra-estrutura, transporte, energia, mobilidade e comunicação.

**JEL:** R41, Q54, C23.

## 1 INTRODUÇÃO

O transporte marítimo constitui o principal modal de movimentação de cargas no comércio internacional, sustentado por sua elevada eficiência energética, baixo custo operacional e confiabilidade em longas distâncias. Estima-se que mais de 80% do volume total das trocas comerciais globais ocorra por meio de rotas marítimas, o que reforça sua importância estratégica para a economia mundial (World Bank, 2023). Nesse contexto, os portos desempenham papel central como infraestruturas críticas para a articulação das cadeias globais de suprimentos.

No Brasil, o setor portuário tem avançado significativamente nas últimas décadas, especialmente a partir da promulgação da Lei nº 8.630/1993<sup>5</sup>, posteriormente substituída pela Lei nº 12.815/2013<sup>6</sup>, que modernizou o marco regulatório e ampliou os mecanismos de gestão e operação (Brasil, 1993; Brasil, 2013). Em 2023, o Brasil figurou entre as 25 maiores economias em volume de chamadas portuárias, com destaque para operações em larga escala na movimentação de contêineres (UNCTAD, 2024). A movimentação nacional portuária em 2024 totalizou 948,17 milhões de toneladas em operações de longo curso, sendo 69% compostas por cargas containerizadas. As projeções da Agência Nacional de Transportes Aquaviários (ANTAQ, 2025) apontam continuidade no crescimento, com expectativa de 1,33 bilhão de toneladas movimentadas em 2025.

Apesar desse dinamismo, o setor enfrenta desafios significativos impostos pelas mudanças climáticas. Localizados em áreas litorâneas, os portos são particularmente vulneráveis aos efeitos adversos de eventos extremos, como tempestades, ventos intensos, chuvas volumosas e ressacas marítimas. O Painel Intergovernamental sobre Mudança do Clima (IPCC, 2023) alerta que o aquecimento global provocará transformações simultâneas, com riscos interligados entre os setores logístico e econômico. Alterações irreversíveis, como a elevação do nível do mar, devem persistir por milênios, agravando ainda mais a vulnerabilidade das infraestruturas portuárias. Nesse cenário, a resiliência operacional e a capacidade adaptativa dos portos se tornam essenciais para manter a continuidade e a eficiência técnica das operações.

O presente estudo tem como objetivo analisar os efeitos de múltiplas variáveis climáticas, incluindo velocidade do vento, rajadas, temperatura, umidade e precipitação, sobre a eficiência técnica dos principais complexos portuários brasileiros no período de 2020 a 2024. A amostra inclui os portos de Itaguaí, Itajaí, Itaquí, Paranaguá-Antonina, Rio Grande, Santos, São Francisco do Sul e Vitória, que, juntos, responderam por mais de 70% do comércio exterior nacional durante o período analisado<sup>7</sup>.

<sup>5</sup> Lei nº 8.630, de 25 de fevereiro de 1993. Disponível em: <[https://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/leis/L8630.htm](https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/L8630.htm) impressao.htm>.

<sup>6</sup> Lei nº 12.815, de 5 de junho de 2013. Disponível em: <[https://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_Ato2011-2014/2013/Lei/L12815.htm#art76](https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2011-2014/2013/Lei/L12815.htm#art76)>.

<sup>7</sup> Para mais informações sobre o transporte de longo curso durante o período do estudo, acessar o Estatístico Aquaviário da ANTAQ. Disponível em: <<https://web3.antaq.gov.br/ea/sense/transplongocurso.html#pt>>

Busca-se, em particular, avaliar de forma agregada os impactos de condições ambientais adversas sobre a eficiência técnica do sistema portuário nacional, fornecendo evidências para o desenvolvimento de estratégias de adaptação mais eficazes. Até o momento, não foram encontrados estudos que utilizem a análise de eficiência técnica para mensurar diretamente os impactos de variáveis climáticas sobre o desempenho portuário no Brasil. Este trabalho busca preencher essa lacuna por meio da aplicação da metodologia de Fronteira Estocástica (*Stochastic Frontier Analysis – SFA*), que permite estimar tanto o nível médio de eficiência quanto sua variabilidade sob diferentes condições ambientais.

Além da contribuição acadêmica, os resultados têm relevância prática para operadores e formuladores de políticas públicas. A compreensão detalhada dos efeitos climáticos sobre a eficiência técnica permite orientar decisões sobre investimentos em infraestrutura resiliente, protocolos operacionais e medidas de mitigação. Em um cenário de intensificação das mudanças climáticas, tais estratégias são fundamentais para garantir a competitividade e a estabilidade do sistema portuário brasileiro (Ng *et al.*, 2018; IPCC, 2023; UNCTAD, 2024).

Este artigo está estruturado da seguinte forma: a Seção 2 apresenta a revisão da literatura; a Seção 3 detalha a metodologia; a Seção 4 discute os principais resultados empíricos; e a Seção 5 reúne as considerações finais do estudo.

## 2 REVISÃO DE LITERATURA

Esta seção discute a literatura sobre eficiência técnica portuária, com ênfase nas aplicações da Análise de Fronteira Estocástica (SFA). A eficiência e produtividade dos portos têm se consolidado como temas centrais na literatura econômica e de transportes, especialmente com a difusão de técnicas como a Análise Envoltória de Dados (DEA) e a própria SFA, ambas voltadas à mensuração da eficiência técnica a partir da relação entre insumos e produtos.

Nesse sentido, a literatura recente tem ressaltado o papel central dos custos de transporte e da infraestrutura portuária na dinâmica do comércio internacional, especialmente para países em desenvolvimento. O estudo seminal conduzido por Clark; Dollar; Micco (2004) aponta que a eficiência portuária é fator determinante nos custos de transporte, sendo que sua elevação pode equivaler a uma redução de 60% na distância até os mercados. Segundo os autores, aspectos como excesso de regulação, crime organizado e infraestrutura precária explicam boa parte das ineficiências portuárias, com implicações significativas no volume de comércio bilateral (Clark; Dollar; Micco, 2004).

O papel das reformas institucionais e operacionais como motores de eficiência também foi objeto de estudo da literatura. Alemán *et al.* (2016) investigaram os portos de 70 países em desenvolvimento entre 2000 e 2010, observando um aumento médio de 10 pontos percentuais na eficiência portuária. Essa heterogeneidade é explicada por mudanças de eficiência pura, e não pela eficiência de escala das mudanças tecnológicas e da participação privada. A conectividade multimodal e redução da corrupção pública destacaram-se como variáveis críticas para a melhoria do desempenho operacional, refletindo um avanço estrutural nas capacidades logísticas dessas regiões (Alemán *et al.*, 2016).

Avaliando a América Latina e o Caribe, Sarriera *et al.* (2013), aplicaram um modelo de Análise de Fronteira Estocástica (SFA) para mensurar a eficiência técnica de 67 portos ao longo de dez anos. Os resultados indicam um avanço na eficiência técnica média dos portos da América Latina e do Caribe, que passou de 36% em 1999 para 50% em 2009. No mesmo ano, o porto mais eficiente atingiu 94% em relação à fronteira de eficiência. O estudo ressalta que portos especializados em contêineres, com menor corrupção e com maior renda per capita tendem a

apresentar maior eficiência técnica, embora as correlações observadas variem em intensidade. O trabalho também destaca o papel da infraestrutura física (como guindastes e berços) no desempenho técnico dos terminais (Sarriera *et al.*, 2013).

Com foco semelhante, Serebrisky *et al.* (2016) analisaram 63 portos da mesma região e período, também com a utilização da Análise de Fronteira Estocástica (SFA) e alguns refinamentos metodológicos para distinguir os guindastes de pórtico navio-terra dos guindastes móveis, reconhecendo a maior produtividade dos primeiros, incluíram uma variável binária para identificar portos que utilizam guindastes de navios, tratados como fonte adicional de produtividade, e adicionaram outra variável binária para portos que operam como centros de transbordo. Os autores constataram que a propriedade privada das operações portuárias tem relação positiva e significativa com a eficiência técnica, corroborando a hipótese de que modelos de gestão privada são mais eficazes na alocação de recursos e na resposta à demanda logística (Serebrisky *et al.*, 2016).

Nessa lógica da eficiência técnica, Krljan *et al.* (2021) avançou com sua análise para os portos integrantes da *North Adriatic Ports Association (NAPA)*<sup>8</sup>, localizados em uma região geográfica estreita e conectados pelo mesmo corredor logístico. O objetivo central foi estimar a eficiência técnica desses terminais de médio porte, avaliar diferentes especificações do modelo e realizar análises de sensibilidade. Para isso, os autores empregaram a metodologia de Análise de Fronteira Estocástica (SFA), com dados em painel balanceado de primeira ordem, considerando formas funcionais Cobb-Douglas e translogarítmica com variáveis de controle. Os resultados indicaram que a eficiência técnica variou entre 65,24% e 93,92%, com média global de 78,49% e tendência positiva de 1,28% no período analisado. O estudo também revelou que terminais com maior eficiência técnica não são necessariamente os mais produtivos, destacando a complexidade na relação entre eficiência e desempenho operacional em contextos portuários competitivos (Krljan *et al.*, 2021).

No contexto da avaliação da eficiência técnica portuária nacional, Menegazzo; Fachinello (2014) buscaram projetar os níveis de eficiência dos principais complexos portuários brasileiros a partir da aplicação da Análise Envoltória de Dados (DEA). O estudo teve como objetivo suprir a lacuna existente na literatura ao considerar as novas projeções de demanda e capacidade previstas nos Planos Mestres para os anos de 2020 e 2025, estimando a eficiência técnica com base em variáveis projetadas como capacidade em nível de serviço, superutilização da capacidade, movimentação total de cargas e número de atracções. Os principais resultados apontam a predominância de maior eficiência nos portos das regiões Sudeste e Nordeste, enquanto as regiões Norte e Sul apresentaram limitações associadas à menor quantidade de atracções e à capacidade insuficiente para diferentes naturezas de carga. Apesar das restrições de dados e escopo, os autores defendem a importância da retomada do planejamento governamental como meio para elevar os níveis de eficiência, distribuir melhor a demanda entre os portos e otimizar o uso da infraestrutura disponível, sobretudo em regiões com maior ociosidade, como a região Sul (Menegazzo; Fachinello, 2014).

A literatura também tem buscado medir os impactos da volatilidade econômica e de crises sistêmicas sobre a produtividade portuária. Wilmsmeier; Tovar; Sanchez (2013), aplicaram a Análise Envoltória de Dados (DEA) a 20 terminais de dez países da América Latina, Caribe e Espanha. Os resultados apresentados demonstram claramente as mudanças na produtividade ao

<sup>8</sup> A *North Adriatic Ports Association (NAPA)* é uma aliança entre portos marítimos localizados no norte do Adriático, criada com o propósito de intensificar a cooperação regional e consolidar a posição estratégica da área como principal porta de entrada para a Europa Central. Além disso, o NAPA busca harmonizar os sistemas de informação e a organização dos portos membros, com o objetivo de atrair maior volume de tráfego e se posicionar como uma plataforma logística europeia voltada ao fluxo de cargas provenientes do Extremo Oriente com destino à Europa Central.

se comparar os períodos pré-crise, crise e pós-crise do período entre 2008 e 2009, evidenciando, em um primeiro momento, perdas significativas de produtividade e eficiência provocadas pela crise econômica, seguidas por uma forte recuperação. Além disso, o estudo contribui para a literatura ao ser um dos primeiros a incorporar a mão de obra como variável de entrada, aspecto pouco explorado em estudos anteriores (Wilmsmeier; Tovar; Sanchez, 2013).

Outro fator crítico apontado pela literatura diz respeito ao tempo de permanência dos navios nos portos. Slack *et al.* (2018) analisaram a rotação média de navios de contêineres em 70 portos e constataram fraca correlação entre tempo de permanência e eficiência portuária, sugerindo que esse indicador está mais ligado a fatores regionais e operacionais do que à produtividade em si. Os resultados discutidos mostram que a variabilidade da demanda e os atrasos nas chegadas dos navios podem distorcer as métricas convencionais de desempenho (Slack *et al.*, 2018).

A baixa confiabilidade dos cronogramas é uma questão sensível para operadores logísticos. Notteboom (2006); Vernimmen; Dullaert; Engelen (2007) abordam que o aumento do congestionamento portuário e as restrições de infraestrutura são alguns dos motivos que impedem as companhias marítimas de fornecer serviços de transporte marítimo regular aos seus clientes. Os autores destacam que o gerenciamento do tempo nos cronogramas de transporte regular envolve compensações complexas entre confiabilidade, custos logísticos e capacidade de reserva, especialmente em contextos de demanda incerta (Notteboom, 2006; Vernimmen; Dullaert; Engelen, 2007).

Esse mesmo *trade-off* é analisado por Tovar; Wall (2014), ao demonstrarem que a maior variabilidade na demanda por serviços portuários tende a elevar os custos e reduzir a eficiência técnica, ao exigir estruturas de reserva subutilizadas. Neste contexto, quanto menor o tempo de rotação do navio, mais eficiente um porto será considerado pelos profissionais, mas este serviço rápido pode resultar numa sobrecapacidade portuária que só será utilizada durante os picos de procura (permanecendo sem utilização durante os períodos de baixa procura) e reduzindo a eficiência dos portos da perspectiva da análise da produtividade. A literatura de produtividade, portanto, alerta para a tensão entre manter altos níveis de serviço e evitar a ociosidade de ativos (Alvarez; Roibas; Wall, 2012; Tovar; Wall, 2014). Além dos aspectos operacionais e institucionais, uma vertente emergente da literatura tem se dedicado a compreender os efeitos das variáveis ambientais e meteorológicas sobre a eficiência portuária.

O impacto direto do clima nas manobras e operações portuárias também tem sido documentado em estudos aplicados. Eloot *et al.* (2009) e Szymoński (2013) analisaram os desafios operacionais impostos por ventos fortes e ondulações, que afetam a atracação, o uso de guindastes e até a integridade estrutural das embarcações e das instalações portuárias, reforçando a importância de modelos preditivos e sistemas de apoio à decisão baseados em variáveis ambientais (Eloot *et al.*, 2009; Szymoński, 2013). Diante disso, compreender a variabilidade climática e antecipar seus efeitos sobre a rotina operacional torna-se essencial para a resiliência e a competitividade dos portos. Além disso, o estudo evidencia a necessidade de integração entre meteorologia, engenharia portuária e gestão operacional como estratégia para mitigar riscos e aumentar a previsibilidade das operações.

Em paralelo, Alonso; Moura; Roibas (2020) inovaram ao destacar o papel das variáveis meteorológicas como a velocidade do vento e a altura das ondas na produtividade dos portos espanhóis no período de 1992 a 2016. Reconhecendo que o transporte marítimo é particularmente sensível a variáveis meteorológicas, como vento, altura das ondas, chuva e neblina, os autores adotaram uma abordagem baseada na metodologia de Análise de Fronteira Estocástica (SFA) para avaliar a influência direta dessas variáveis na eficiência técnica portuária. Além disso, consideraram a amplitude da maré como variável de controle devido à sua correlação com vento e ondas. A análise incluiu simulações para quantificar o efeito dessas condições climáticas sobre

a produtividade dos terminais. Os principais resultados indicam que as variáveis meteorológicas exercem impacto significativo na eficiência técnica dos portos, sendo responsáveis por uma variação de 5,3% na eficiência média durante o período estudado (Alonso; Moura; Roibas, 2020).

Dentro de outra perspectiva e com o objetivo de analisar os efeitos dos investimentos privados sobre a eficiência de custos no setor portuário, Gallego; Sánchez (2025) investigaram 26 autoridades portuárias espanholas que operam sob o modelo *landlord*<sup>9</sup>. Os autores aplicaram uma abordagem da Análise de Fronteira Estocástica (SFA) de Custos de curto prazo, com especificação normal-normal truncada, permitindo que a ineficiência dependesse de variáveis exógenas, como investimento privado, concentração de tráfego e reformas institucionais. Os resultados indicaram que tanto o aumento dos investimentos privados quanto a maior concentração de tráfego estão associados à redução da ineficiência de custos. No entanto, observou-se que os ganhos de eficiência advindos do capital privado diminuíram após a promulgação da Lei 33/2010<sup>10</sup>, revelando retornos marginais decrescentes em níveis elevados de investimento (Gallego; Sánchez, 2025).

Corroborando com essa perspectiva da importância de investimentos privados para o aumento da eficiência técnica, recentemente Adler *et al.* (2025) ao analisar como aspectos de governança portuária influenciam a eficiência técnica de portos de contêineres, com foco em regiões do Extremo Oriente e da Ásia, investigaram como o grau de privatização, a concorrência entre portos (interna e no transbordo), e os tipos de regulação influenciam a eficiência técnica dos portos. O estudo aplicou Análise de Fronteira Estocástica (SFA) e constatou que portos com maior participação privada apresentam maior eficiência técnica. Regulação por agências independentes é mais eficaz do que por ministérios ou autoridades portuárias. A concorrência nas operações de transbordo também contribui positivamente para a eficiência. Os autores reforçam a questão de governança como fatores decisivos para o aumento do desempenho portuário (Adler *et al.*, 2025).

Diante do exposto, a literatura especializada demonstra, de forma consistente, que a eficiência técnica portuária é um componente estratégico para o desempenho logístico e econômico dos países, sendo influenciada por uma variedade de fatores, como infraestrutura, governança, grau de privatização, variáveis climáticas e condições institucionais. No entanto, observa-se ainda uma lacuna importante relacionada à incorporação de variáveis ambientais, em especial fatores climáticos extremos, nos modelos de avaliação de desempenho. Essa omissão é particularmente preocupante diante das projeções de intensificação dos eventos climáticos, que podem comprometer a resiliência dos sistemas portuários. Nesse contexto, torna-se fundamental desenvolver estudos que integrem as dimensões operacionais e ambientais da eficiência técnica, de modo a subsidiar políticas públicas, estratégias empresariais e investimentos orientados à adaptação climática e à sustentabilidade dos portos.

Embora estudos recentes já indiquem o impacto das condições meteorológicas sobre a eficiência portuária, poucos incorporam sistematicamente essas variáveis em modelos econométricos de Fronteira Estocástica com estrutura em painel e heterocedasticidade observável. Este estudo contribui para preencher essa lacuna ao integrar métricas ambientais detalhadas, como

<sup>9</sup> Trata-se de um modelo de governança portuária em que o Estado permanece como proprietário do porto e de sua infraestrutura essencial, porém transfere à iniciativa privada a responsabilidade pela administração e operação dos terminais e serviços, por meio de contratos de arrendamento ou concessão.

<sup>10</sup> A Lei 33/2010 fortaleceu a participação do setor privado nos portos espanhóis ao reformular o sistema portuário com o objetivo de aumentar sua competitividade e alinhá-lo às diretrizes da União Europeia. A legislação também concedeu às autoridades portuárias públicas maior autonomia para ajustar suas tarifas conforme as condições de mercado, o que contribuiu para atrair operadores privados. Essa flexibilização tarifária permitiu aos portos oferecerem preços mais competitivos, estimulando um ambiente de negócios mais dinâmico e eficiente (Gallego; Sánchez, 2025).

vento, precipitação e temperatura, entre outras, na modelagem da eficiência técnica dos portos brasileiros.

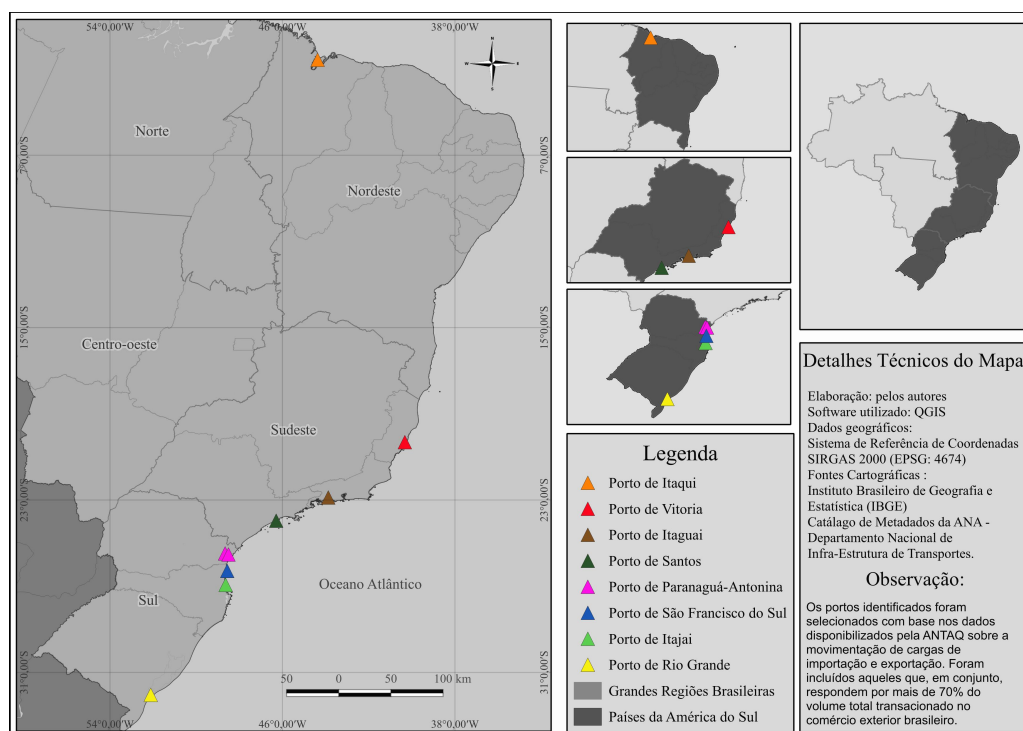
### 3 METODOLOGIA

Esta seção apresenta os principais procedimentos metodológicos adotados no estudo, abrangendo a construção e organização da base de dados, a especificação do modelo de Fronteira Estocástica e a estruturação das simulações com base em variáveis climáticas. A abordagem busca integrar fundamentos teóricos e técnicas econométricas adequadas à análise da eficiência técnica em contextos portuários sujeitos a múltiplos produtos e condições ambientais variáveis.

#### 3.1 Dados

A base de dados utilizada neste estudo foi construída a partir de informações operacionais extraídas da Agência Nacional de Transportes Aquaviários (ANTAQ, 2025)<sup>11</sup> e contempla o período de janeiro de 2020 a dezembro de 2024. A unidade de observação corresponde ao complexo portuário por mês, resultando em uma estrutura de painel com periodicidade mensal. A amostra inclui oito complexos portuários: Itaguaí, Itajaí, Itaquí, Paranaguá-Antonina, Rio Grande, Santos, São Francisco do Sul e Vitória, responsáveis, conjuntamente, por mais de 70% da movimentação portuária brasileira no período analisado. A distribuição geográfica desses complexos está apresentada na Figura 1.

Figura 1 — Localização geográfica dos principais portos brasileiros considerados no estudo



**Fonte:** Elaborado pelos autores.

<sup>11</sup> Informações adicionais sobre os dados da ANTAQ podem ser consultadas em: <<https://web3.antaq.gov.br/ea/sen/se/download.html>>.

A base original da ANTAQ contém um conjunto abrangente de variáveis, incluindo: ano, mês, unidade federativa, município, tipo de instalação, complexo portuário, nome da instalação, coordenadas geográficas (latitude e longitude), tipo de terminal, tipo de navegação, identificador da atracação, número da embarcação *IMO*<sup>12</sup>, número da capitania<sup>13</sup>, além das datas de chegada, atracação, início e fim de operação, e desatracação.

Com base nessas informações, foram calculadas por meio de rotinas em *Python* variáveis operacionais relevantes: tempo até o início da atracação, tempo até o início da operação, tempo de operação, tempo até a desatracação, tempo total de estadia e tempo atracado. Também foi construída a variável parada climática, a partir da vinculação entre informações de movimentação e registros de paralisação fornecidos pela ANTAQ. Essa variável corresponde ao número de eventos de paralisação por razões climáticas registrados por complexo em cada mês, refletindo sua frequência de ocorrência ao longo do tempo. A identificação única de cada evento portuário foi assegurada pela combinação dos números IMO e da Capitania dos Portos.

A segunda etapa envolveu a coleta de informações sobre a infraestrutura dos complexos portuários, extraídas de seus respectivos Planos Mestres<sup>14</sup>. Foram incluídas variáveis como número de berços, comprimento total dos berços, calado máximo, número de armazéns, silos/tanques, pátios e equipamentos. Contudo, é importante destacar que tais dados apresentam limitações, uma vez que nem todos os portos possuem Planos Mestres acessíveis. Diante disso, considerou-se um valor fixo para a infraestrutura ao longo do tempo, replicando-se as informações disponíveis para todo o período analisado. Embora essa suposição implique na perda de variação temporal, trata-se de uma restrição comum em estudos que dependem de informações públicas limitadas sobre infraestrutura portuária.

Na terceira etapa, foram integradas variáveis climáticas obtidas do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), com frequência horária. As informações climáticas foram espacialmente interpoladas utilizando o método *Inverse Distance Weighting (IDW)*<sup>15</sup>, com base nas coordenadas das estações do INMET e dos complexos portuários. Esse procedimento foi executado em *Python* com o auxílio de unidade de processamento gráfico (GPU)<sup>16</sup>, e considerou o intervalo entre a chegada e a desatracação de cada navio. As variáveis climáticas construídas incluem: precipitação horária, temperatura máxima e mínima na hora anterior, umidade relativa (média, mínima e máxima), velocidade do vento e rajadas. Também foram calculadas as médias mensais dessas variáveis, correspondentes ao mês em que cada navio permaneceu no complexo portuário.

Cabe destacar que, embora a base construída seja ampla e inclua uma variedade de indicadores operacionais, climáticos e estruturais, a modelagem final considera apenas um subconjunto dessas variáveis. A seleção foi orientada por critérios teóricos e por testes empíricos de multicolinearidade, de forma a garantir robustez e parcimônia na estimação da eficiência técnica. Além disso, uma observação com movimentação nula de carga geral (ocorrida em Itajaí no mês de julho de 2020) foi excluída, resultando em uma amostra final composta por 479 observações. A

<sup>12</sup> O número (*IMO*) (*International Maritime Organization*) é um identificador único e permanente atribuído a cada navio mercante. Ele permite a rastreabilidade da embarcação independentemente de mudanças de nome, bandeira ou proprietário, sendo amplamente utilizado para fins de segurança e controle operacional.

<sup>13</sup> Número da capitania: código identificador atribuído pela Capitania dos Portos, órgão da Marinha do Brasil responsável por supervisionar e controlar as atividades náuticas.

<sup>14</sup> Os Planos Mestres são documentos estratégicos que definem a organização, o desenvolvimento e a expansão futura das instalações portuárias, incluindo aspectos de infraestrutura, logística, meio ambiente e operação, servindo como guia para o planejamento e gestão dos complexos portuários.

<sup>15</sup> O método *Inverse Distance Weighting (IDW)* é uma técnica de interpolação espacial que estima valores em locais não amostrados com base nos valores próximos, atribuindo maior peso a pontos mais próximos.

<sup>16</sup> Uma GPU (*Graphics Processing Unit*) computacional dedicada é um hardware especializado projetado para realizar cálculos paralelos de alta performance, sendo amplamente utilizada para acelerar processos computacionais intensivos, como análise de grandes volumes de dados e simulações científicas.

Tabela 1 apresenta estatísticas descritivas das principais variáveis utilizadas na análise.

Tabela 1 — Estatísticas descritivas das variáveis utilizadas na modelagem (2020–2024)

Variável	Média	Desvio-padrão	Mínimo	Máximo
Carga geral (t)	349.465,80	233.087,40	0	1.016.138
Carga de granel sólido (t)	5.853.880,00	5.565.362,00	0	22.700.000
Carga containerizada (t)	1.016.904,00	1.218.450,00	0	4.831.283
Carga de granel líquido/gasoso (t)	514.615,60	464.070,40	0	1.636.401
Comprimento total dos berços (m)	3.922,37	2.007,28	800,00	8.055,48
Número de armazéns	21,00	13,90	2	40
Número de equipamentos	230,75	119,88	93	468
Número de paradas climáticas	20,86	24,51	0	97
Tempo atracado (h)	51,03	15,21	15,08	167,34
Tempo de paralisação por chuva (h)	2,60	4,41	0	25,22
Precipitação (mm/h)	9,46	9,00	0,11	57,21
Temperatura média mensal (°C)	21,31	3,16	13,25	28,13
Umidade relativa média mensal (%)	79,93	4,52	67,09	89,95
Velocidade média do vento (m/s)	1,09	0,44	0,05	2,40
Velocidade média das rajadas (m/s)	3,44	1,01	0,14	6,13

**Fonte::** Elaborado pelos autores com base nos dados do estudo.

Observa-se ampla variação entre os complexos, especialmente nas variáveis de *output*, como carga em granel sólido e carga containerizada, cujos desvios padrão superam ou se aproximam da média, evidenciando a heterogeneidade operacional da amostra. Variáveis climáticas também apresentam dispersão considerável, refletindo as diferenças geográficas, sazonais e estruturais típicas de uma costa extensa e climatologicamente diversa como a brasileira. Observa-se, por exemplo, que Santos e Rio Grande concentram os maiores tempos totais de atracação e paralisação por chuva, além de registrarem as frequências mais altas de parada por razões climáticas ao longo de todo o período, sugerindo maior vulnerabilidade a eventos meteorológicos extremos. Da mesma forma, os padrões de precipitação, temperatura, umidade e ventos variam entre os portos, com destaque para as chuvas mais intensas em Itaguaí e Paranaguá e para as rajadas de vento mais fortes em Rio Grande e Santos, ilustrando as diferentes condições climáticas que podem afetar a eficiência operacional de forma desigual entre os complexos portuários.

Essas diferenças também se expressam nas tendências temporais das variáveis climáticas, estimadas a partir de modelos lineares com efeitos fixos por complexo portuário. Para cada variável, foi estimada a seguinte especificação:

$$Y_{it} = \alpha_i + \beta t + \gamma_i t + \varepsilon_{it} \quad (1)$$

onde  $Y_{it}$  representa a variável climática de interesse no complexo  $i$  e mês  $t$ ,  $\alpha_i$  são os efeitos fixos por complexo,  $\beta$  é a tendência comum e  $\gamma_i$  representa a variação específica da tendência em relação à média. A Tabela 2 resume os coeficientes estimados das tendências específicas ( $\gamma_{it}$ ) para cada complexo portuário, destacando as direções e significâncias estatísticas observadas.

Tabela 2 — Tendência específica das variáveis climáticas por complexo portuário (2020–2024)

Complexo	Temp. (°C)	Precip. (mm/h)	Umid. (%)	Vento (m/s)	Rajada (m/s)
Todos	0,014**	-0,041	0,007	0,002	0,006
Itajaí	-0,007	0,152*	0,040	0,003	0,008
Itaqui	0,007	0,059	-0,094***	0,005**	0,013*
Paranaguá–Antonina	-0,004	0,235***	-0,004	0,013***	0,012
Rio Grande	-0,013	0,197**	0,147***	0,002	0,004
Santos	0,006	0,130	0,115***	-0,001	-0,001
São Francisco do Sul	-0,002	0,251***	0,039	0,010***	0,017**
Vitória	0,001	-0,025	-0,097***	0,001	0,001

**Fonte:** Elaborado pelos autores com base nos dados do estudo.

**Nota:** Significância: \* $p < 0,10$ ; \*\* $p < 0,05$ ; \*\*\* $p < 0,01$ .

Verifica-se, por exemplo, que Itaqui apresenta tendência significativa de queda na umidade, enquanto Paranaguá, Rio Grande e São Francisco do Sul registram aumento expressivo na precipitação média ao longo do tempo. No caso da velocidade do vento e de rajadas, complexos como Paranaguá, Vitória e novamente São Francisco do Sul exibem tendências ascendentes, indicando condições meteorológicas potencialmente mais adversas no futuro. Por outro lado, as tendências de temperatura média mensal não apresentam significância estatística robusta para a maioria dos portos, sugerindo estabilidade relativa no período analisado.

Essas evidências reforçam a necessidade de incorporar heterogeneidade climática e tendências regionais em análises de eficiência portuária, dado que os impactos operacionais desses fenômenos podem não apenas diferir entre os complexos, mas também se intensificar com o tempo em função de padrões locais de mudança climática.

### 3.2 Modelo De Fronteira Estocástica

A eficiência técnica dos complexos portuários foi estimada por meio de uma função de distância orientada ao *output*, com especificação translog normalizada. A função considera múltiplos produtos (granel sólido, containerizado e granel líquido/gasoso), normalizados pela carga geral, conforme recomendação da literatura para ambientes multiproduto (Alonso; Moura; Roibas, 2020). A orientação ao *output* é mantida por meio da inversão do logaritmo da variável de normalização (carga geral), procedimento comum em funções distância normalizadas, de forma a garantir coerência na interpretação da eficiência técnica. A abordagem permite flexibilidade na substituição entre os tipos de carga e na incorporação de variáveis de infraestrutura e condições climáticas.

A equação estimada pode ser expressa da seguinte forma:

$$-\ln(y_{1it}) = f(\ln x_{jit}, \ln y_{2it}, \ln y_{3it}, \ln y_{4it}, t, t^2, \text{interações}) + v_{it} - u_{it} \quad (2)$$

Onde:  $y_{1it}$  representa a carga geral, utilizada como denominador na normalização;  $y_{2it}$ ,  $y_{3it}$  e  $y_{4it}$  são os demais tipos de carga (granel sólido, containerizada e granel líquido/gasoso) normalizados por  $y_1$ ;  $x_{jit}$  inclui os insumos: comprimento dos berços, número de armazéns, número de

equipamentos, tempo atracado, paralisações climáticas, tempo perdido por chuva e variáveis climáticas médias mensais (temperatura, umidade, velocidade do vento e rajadas);  $t$  representa a tendência temporal (contagem de meses desde janeiro de 2020);  $v_{it} \sim \mathcal{N}(0, \sigma_v^2)$  é o componente aleatório;  $u_{it} \sim \mathcal{N}^+(\mu_{it}, \sigma_u^2)$  é o termo de ineficiência técnica, com heterogeneidade observável.

As variáveis explicativas foram transformadas em logaritmos naturais após acréscimo de 1 (para evitar indefinições), e foram realizados testes de multicolinearidade entre os grupos de variáveis. A seleção final resultou na inclusão de: comprimento dos berços, número de armazéns, número de equipamentos, tempo atracado, número de paralisações climáticas, tempo de paralisação por chuva, precipitação, temperatura média mensal, umidade relativa média mensal, velocidade média do vento e velocidade média das rajadas. Termos quadráticos e interações cruzadas entre essas variáveis foram incluídos conforme a formulação translog.

Além disso, modelou-se a heterocedasticidade dos componentes do erro. A variância do termo aleatório  $v_{it}$  foi especificada como função log-linear das variáveis climáticas médias (temperatura, umidade e precipitação), enquanto a variância do termo de ineficiência técnica  $u_{it}$  foi modelada em função das velocidades médias do vento e das rajadas:

$$\ln \sigma_{v,it}^2 = \delta_0 + \delta_1 \text{Temp}_{it} + \delta_2 \text{Umid}_{it} + \delta_3 \text{Prec}_{it} \quad (3)$$

$$\ln \sigma_{u,it}^2 = \theta_0 + \theta_1 \text{Vento}_{it} + \theta_2 \text{Rajada}_{it} \quad (4)$$

Essa especificação permite avaliar como as condições climáticas influenciam não apenas o nível esperado de ineficiência, mas também sua variabilidade, refletindo maior ou menor exposição dos complexos a choques ambientais imprevisíveis. Por fim, a eficiência técnica foi recuperada a partir do termo ineficiente estimado  $u_{it}$ , por meio da transformação  $TE_{it} = \exp(-u_{it})$ , com valores variando entre 0 e 1.

### 3.3 Simulações De Choques Climáticos

Com o objetivo de explorar os efeitos potenciais de mudanças nas condições climáticas sobre a eficiência técnica, foram conduzidas simulações contrafactuais. Em particular, estimou-se o impacto de reduções hipotéticas de 10% e 15% na velocidade média do vento e das rajadas, variáveis que influenciam diretamente a variância do componente ineficiente  $u_{it}$ .

As simulações consistem em reestimar os valores previstos de eficiência técnica para cada observação da amostra, mantendo constantes todas as demais variáveis e reduzindo isoladamente as variáveis de vento. O exercício permite quantificar os ganhos potenciais de eficiência em um cenário de menor severidade climática, com implicações relevantes para estratégias de mitigação e adaptação às mudanças climáticas no setor portuário. Em particular, os resultados podem embasar a priorização de investimentos em infraestrutura resiliente e ações de planejamento adaptativo em portos mais vulneráveis às adversidades climáticas, contribuindo para a redução de ineficiências futuras.

## 4 RESULTADOS

Esta seção apresenta os resultados empíricos obtidos por meio da estimação do modelo de Fronteira Estocástica (SFA), adotando uma especificação translog com orientação ao produto e estrutura de painel mensal. O objetivo central é identificar os principais determinantes da eficiência técnica nos complexos portuários analisados, com ênfase nas influências exercidas por variáveis climáticas. Os coeficientes estimados oferecem evidências quantitativas sobre os elementos que mais contribuem para a ineficiência técnica no contexto portuário brasileiro.

#### 4.1 Estimativas Do Modelo De Fronteira Estocástica

A Tabela 3 apresenta os coeficientes estimados da função distância translog normalizada, com orientação ao *output* e estrutura de painel mensal. O modelo incorporou variáveis log-transformadas relacionadas à infraestrutura, tempo operacional, clima médio e eventos extremos, além de termos quadráticos e interações cruzadas. Por uma questão de espaço, a tabela exibe apenas os termos quadráticos e interações cruzadas que se mostraram estatisticamente significativos.

Tabela 3 — Coeficientes estimados da função distância translog

Variável	Coeficiente	Erro-padrão
Comprimento	-1,4911***	0,4292
Armazéns	1,6281***	0,4465
Equipamentos operacionais	1,1553***	0,4034
Tempo atracado	-1,2145***	0,3181
Paradas climáticas	-0,2554**	0,1007
Tempo perdido por chuva	-0,2085**	0,0923
Precipitação média diária	-0,1483*	0,0842
Temperatura média mensal	-0,1916*	0,0981
Umidade relativa média mensal	-0,5091***	0,1433
Velocidade média do vento	-0,2649***	0,0960
Rajadas de vento médias	-0,2383**	0,1037
Temperatura média mensal <sup>2</sup>	0,1198*	0,0646
Umidade relativa média mensal <sup>2</sup>	0,3212**	0,1345
Rajadas de vento × Velocidade média do vento	0,1675*	0,0904

**Fonte:** Elaborado pelos autores com base nos dados do estudo.

**Nota:** Significância: \*\*\*p < 0,01; \*\*p < 0,05; \*p < 0,10.

Os resultados revelam que variáveis operacionais e climáticas estão significativamente associadas à ineficiência técnica dos complexos portuários. A maior extensão dos berços (comprimento) está relacionada a menor eficiência, enquanto o número de armazéns e de equipamentos operacionais contribuem positivamente para a proximidade da fronteira de eficiência, sugerindo que investimentos em infraestrutura estão associados à redução de ineficiências. O tempo atracado apresenta um coeficiente negativo e significativo, indicando que durações maiores de permanência no porto prejudicam o desempenho técnico. Da mesma forma, a maior frequência de paradas climáticas e o tempo perdido por chuva afetam negativamente a eficiência, reforçando o papel dos eventos extremos como entraves operacionais.

As variáveis climáticas médias também apresentam efeitos negativos consistentes. A precipitação média, a temperatura e a umidade relativa mensal possuem coeficientes negativos e estatisticamente significativos, indicando que condições ambientais mais severas comprometem o desempenho técnico dos complexos. Além disso, os termos quadráticos para temperatura e umidade sugerem a presença de efeitos não lineares, com intensidade de impacto variando ao longo das faixas observadas: os efeitos adversos tendem a se intensificar em níveis intermediários dessas variáveis, mas podem se suavizar nos extremos.

Em relação ao vento, tanto a velocidade média quanto as rajadas afetam negativamente a eficiência quando consideradas isoladamente. No entanto, a interação entre essas duas variáveis apresentou sinal positivo e significativo, o que sugere que a combinação moderada de ambas pode

mitigar parcialmente os efeitos prejudiciais. Apesar disso, os efeitos líquidos associados à intensificação dos ventos permanecem predominantemente negativos. Estes resultados, obtidos a partir de um modelo com especificação translog, indicam que a eficiência técnica dos portos brasileiros é influenciada por uma combinação complexa de fatores físicos, operacionais e ambientais. Na subseção seguinte, serão analisados os efeitos dessas variáveis sobre a heterocedasticidade dos componentes do erro, aprofundando a análise da sensibilidade climática do sistema portuário.

## 4.2 Efeitos Da Heterocedasticidade Climatológica

O modelo estimado incorpora heterocedasticidade nos componentes do erro, permitindo que a variância tanto do termo aleatório ( $v_{it}$ ) quanto da ineficiência técnica ( $u_{it}$ ) varie em função das condições climáticas. Isso permite capturar não apenas os efeitos médios do clima sobre a eficiência, mas também sua influência sobre a volatilidade do desempenho técnico portuário.

No caso da variância do componente aleatório ( $\ln \sigma_v^2$ ), os resultados indicam associação positiva e estatisticamente significativa com a temperatura média mensal (coeficiente de 0,3594; erro padrão: 0,1334;  $p < 0,01$ ) e com a precipitação média diária (coeficiente de 0,1711; erro padrão: 0,0883;  $p < 0,10$ ). Esses resultados indicam que o componente aleatório tende a ser mais disperso em contextos de maior calor e chuva, mesmo entre os portos mais próximos à fronteira de eficiência. Isso sugere maior instabilidade nos desempenhos, mesmo sob condições de alto nível técnico, em função de choques climáticos.

Quanto à variância do termo de ineficiência técnica ( $\ln \sigma_u^2$ ), observou-se uma relação positiva com a velocidade média do vento (coeficiente de 0,3035; erro padrão: 0,1134;  $p < 0,01$ ) e com as rajadas de vento médias (coeficiente de 0,2621; erro padrão: 0,1091;  $p < 0,05$ ). Esses coeficientes indicam que, à medida que aumentam os níveis de instabilidade atmosférica associada aos ventos, a dispersão na ineficiência entre os complexos também cresce. Em outras palavras, portos que operam sob ventos mais intensos tendem a apresentar desempenhos mais heterogêneos: alguns absorvem melhor essas condições, enquanto outros sofrem perdas operacionais mais pronunciadas.

Esses resultados reforçam a importância de considerar explicitamente os efeitos da heterocedasticidade climática em modelos de eficiência técnica. Eles sugerem que condições ambientais mais severas não apenas reduzem o nível médio de eficiência, como também aumentam a volatilidade e a incerteza operacional, tornando o sistema portuário mais vulnerável a oscilações externas e exigindo respostas diferenciadas de gestão.

## 4.3 Simulações Contrafactuais: Redução Das Rajadas E Ventos Médios

Com o objetivo de avaliar a sensibilidade da eficiência técnica dos complexos portuários às condições climáticas extremas, foram realizadas simulações contrafactuais a partir do modelo estimado. Os cenários consideraram reduções hipotéticas de 10% e 15% na velocidade média do vento e nas rajadas de vento médias, mantendo todas as demais variáveis constantes. Essa escolha se justifica pelos resultados empíricos da subseção 4.1, nos quais essas variáveis apresentaram efeitos negativos e estatisticamente significativos sobre a eficiência técnica, tanto em nível médio quanto na variância da ineficiência (ver subseção 4.2).

A eficiência técnica média observada na amostra é de 0,774, com dispersão entre os complexos. Sob o cenário de redução de 10% nas duas variáveis de vento, a eficiência técnica média aumentou para 0,787, o que representa um ganho de 1,3 ponto percentual. No cenário de redução de 15%, a eficiência média simulada atingiu 0,794, um aumento de 2,0 pontos percentuais em relação ao valor base. Esses resultados são apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 — Variação na eficiência técnica média sob diferentes cenários climáticos

Cenário	Eficiência Técnica Média	Variação
Observado (baseline)	0,774	—
-10% em velocidade média e rajadas de vento	0,787	+1,3 <i>p.p.</i>
-15% em velocidade média e rajadas de vento	0,794	+2,0 <i>p.p.</i>

**Fonte:** Elaborado pelos autores com base nos dados do estudo.

Esses resultados sugerem que reduções moderadas na intensidade do vento poderiam estar associadas a ganhos agregados de eficiência técnica nos portos analisados. Embora as magnitudes observadas sejam modestas, os efeitos são consistentes em termos de direção e coerentes com os coeficientes estimados do modelo. Vale destacar que as respostas variam entre os complexos portuários, com alguns apresentando melhorias superiores à média e outros com ganhos marginais.

Do ponto de vista metodológico, os valores simulados de eficiência foram gerados a partir da reavaliação do termo de ineficiência técnica  $u_{it}$ , recalculado com os novos valores simulados de vento e rajadas, mantendo todos os demais *inputs* inalterados. A eficiência técnica simulada foi então obtida como  $TE_{it} = \exp(-u_{it})$ , conforme a estrutura do modelo original.

Em síntese, os resultados obtidos a partir da função distância translog reforçam que a eficiência técnica dos portos brasileiros é influenciada por uma combinação complexa de variáveis operacionais e climáticas. Destaca-se o papel adverso de condições ambientais severas, especialmente no que se refere ao vento, à precipitação e à umidade. A inclusão de termos quadráticos e interações cruzadas permitiu capturar efeitos não lineares relevantes, ampliando a compreensão da sensibilidade climática dos portos. Tais achados sustentam a necessidade de incorporar aspectos ambientais nos modelos de desempenho técnico, com vistas a orientar políticas de resiliência e adaptação no setor portuário.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este estudo analisou o impacto das variáveis climáticas sobre a eficiência técnica dos oito principais complexos portuários brasileiros no período de 2020 a 2024, com base em um modelo de Fronteira Estocástica (SFA) com especificação translog e incorporação de heterocedasticidade. A partir da utilização de dados mensais e variáveis operacionais, estruturais e ambientais, buscou-se mensurar em que medida fatores como vento, precipitação e temperatura afetam o desempenho técnico dos portos e sua vulnerabilidade operacional frente a eventos extremos.

Os resultados obtidos evidenciam que variáveis climáticas médias, como velocidade do vento, rajadas, temperatura e umidade, estão negativamente associadas à eficiência técnica dos complexos portuários. Além disso, efeitos não lineares foram identificados, sugerindo que o impacto climático se intensifica em faixas específicas de variabilidade. A análise também revelou que a variância da ineficiência técnica é significativamente afetada por componentes atmosféricos instáveis, como ventos intensos, o que indica maior dispersão nos desempenhos sob essas condições. Simulações contrafactuais mostraram que reduções moderadas na intensidade dos ventos estariam associadas a ganhos agregados de eficiência técnica, ainda que heterogêneos entre os portos.

A principal contribuição do estudo reside na integração entre análises de eficiência e variáveis climáticas operacionais, abordando diretamente a resiliência dos portos brasileiros a choques

ambientais em um contexto de mudanças climáticas em curso. Até onde se tem conhecimento, este é o primeiro trabalho a empregar modelagem de Fronteira Estocástica (SFA) para esse fim no contexto brasileiro. O modelo adotado permitiu captar tanto os efeitos médios quanto a variabilidade da ineficiência, oferecendo um diagnóstico mais completo da performance portuária em ambientes expostos.

Do ponto de vista prático, os resultados oferecem subsídios relevantes para o planejamento portuário e a formulação de políticas de adaptação climática. A identificação de variáveis climáticas críticas permite o direcionamento de investimentos em infraestrutura e tecnologia voltados à mitigação de riscos operacionais. Além disso, os achados podem apoiar a revisão de protocolos de operação e segurança, fortalecendo a resiliência do sistema portuário nacional.

Como limitações, destaca-se a ausência de variáveis financeiras e institucionais que poderiam influenciar a eficiência, bem como a disponibilidade restrita de dados sobre eventos extremos localizados com maior granularidade. Estudos futuros podem aprofundar a abordagem adotada, incorporando análises de eficiência dinâmica, integração com indicadores de desempenho logístico e avaliação de estratégias adaptativas implementadas pelos próprios portos.

Em um cenário de intensificação das mudanças climáticas e crescente complexidade logística global, compreender como fatores ambientais afetam a eficiência técnica dos portos é fundamental para garantir a continuidade, a segurança e a competitividade do comércio marítimo brasileiro.

## REFERÊNCIAS

ADLER, N. *et al.* **The impact of governance** on the technical efficiency of container ports. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, v. 199, p. 104578, 2025. ISSN 0965-8564. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.tra.2025.104578>>.

Agência Nacional de Transportes Aquaviários. **Dados Aquaviários**: base estatística do setor portuário e aquaviário brasileiro. 2025. Acesso em: 24 jul. 2025. Disponível em: <<https://web3.antaq.gov.br/ea/sense/download.html#pt>>.

ALEMÁN, A. S. *et al.* **When it comes to container port efficiency, are all developing regions equal?** *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, v. 86, p. 56–77, 2016. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.tra.2016.01.018>>.

ALONSO, L. G.; MOURA, T. G. Z.; ROIBAS, D. **The effect of weather conditions on port technical efficiency.** *Marine Policy*, v. 113, p. 103816, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.marpol.2020.103816>>.

ALVAREZ, A. R. R.; ROIBAS, D.; WALL, A. **Reserve capacity of public and private hospitals in response to demand uncertainty.** *Health Economics*, v. 21, p. 839–851, 2012. Disponível em: <<https://doi.org/10.1002/hec.1755>>.

ANTAQ. **Pelo terceiro mês consecutivo, portos brasileiros batem recorde de movimentação total.** 2025. Disponível em: <<https://www.gov.br/antaq/pt-br/noticias/2025/pelo-terceiro-mes-consecutivo-portos-brasileiros-batem-recorde-de-movimentacao-total>>. Acesso em: 16 jul. 2025.

BRASIL. **Lei nº 8.630, de 25 de fevereiro de 1993**: dispõe sobre a exploração dos portos organizados e das instalações portuárias e dá outras providências. 1993. Disponível em:

<[https://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/leis/L8630.htm#impresao.htm](https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/L8630.htm#impresao.htm)>. Acesso em: 25 jul. 2025.

BRASIL. **Lei nº 12.815, de 5 de junho de 2013:** dispõe sobre a exploração direta e indireta pela união dos portos organizados e das instalações portuárias e dá outras providências. 2013. Disponível em: <[https://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_Ato2011-2014/2013/Lei/L12815.htm](https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2011-2014/2013/Lei/L12815.htm)>. Acesso em: 25 jul. 2025.

CLARK, X.; DOLLAR, D.; MICCO, A. **Port efficiency, maritime transport costs, and bilateral trade.** *Journal of Development Economics*, v. 75, p. 417–450, 2004. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jdeveco.2004.06.005>>.

ELOOT, K. *et al.* **Development of decision supporting tools for determining tidal windows for deep-drafted vessels.** In: *Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*. CRC Press, 2009. p. 253–260. Disponível em: <<https://doi.org/10.1201/9780203869345-50>>.

GALLEGO, S. H.; SÁNCHEZ, R. N. **The effect of private investment on landlord port authorities' cost efficiency: the spanish case.** *Case Studies on Transport Policy*, v. 20, p. 101474, 2025. ISSN 2213-624X. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.cstp.2025.101474>>.

IPCC. **Mudança do clima 2023:** relatório síntese. contribuição dos grupos de trabalho i, ii e iii ao sexto relatório de avaliação do painel intergovernamental sobre mudança do clima. IPCC, Genebra, 2023. Tradução não oficial realizada pelo Governo do Brasil e pelo Pacto Global da ONU Brasil. Disponível em: <<https://doi.org/10.59327/IPCC/AR6-9789291691647>>.

KRLJAN, T. *et al.* **The Stochastic Frontier Model for Technical Efficiency Estimation of Interconnected Container Terminals.** *Journal of Marine Science and Engineering*, v. 9, n. 5, p. 515, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.3390/jmse9050515>>.

MENEGAZZO, L. R.; FACHINELLO, A. L. **Análise de nível de eficiência dos portos brasileiros:** uma aplicação com o uso da dea e dados dos planos mestres. *Revista de Economia*, Editora UFPR, v. 40, n. 3, p. 173–197, 2014. Disponível em: <<https://revistas.ufpr.br/economia/article/view/42419/27863>>.

NG, A. K. Y. *et al.* **How is Business Adapting to Climate Change Impacts Appropriately?** insight from the commercial port sector. *Journal of Business Ethics*, Springer, v. 150, n. 4, p. 1029–1047, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s10551-016-3179-6>>.

NOTTEBOOM, T. E. **The time factor in liner shipping services.** *Maritime Economics & Logistics*, v. 8, p. 19–39, 2006. Disponível em: <<https://doi.org/10.1057/palgrave.mel.9100148>>.

SARRIERA, J. M. *et al.* **Benchmarking Container Port Technical Efficiency in Latin America and the Caribbean:** a stochastic frontier analysis. n. 6680, 2013. Disponível em: <<https://ssrn.com/abstract=2347788>>.

SEREBRISKY, T. *et al.* **Exploring the drivers of port efficiency in Latin America and the Caribbean.** *Transport Policy*, v. 45, p. 31–45, 2016. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2015.09.004>>.

SLACK, B. *et al.* **Ships time in port.** *International Journal of Shipping and Transport Logistics*, v. 10, n. 1, p. 45–62, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1504/IJSTL.2018.088322>>.

SZYMOŃSKI, M. **Analysis and evaluation of manoeuvrability characteristics of Polish ferries m/f “Polonia” and m/f “Gryf”**. *TransNav, International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*, v. 7, n. 4, p. 515–518, 2013. Disponível em: <<https://doi.org/10.12716/1001.07.04.06>>.

TOVAR, B.; WALL, A. **The impact of demand uncertainty on port infrastructure costs: useful information for regulators?** *Transport Policy*, v. 33, p. 176–183, 2014. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2014.03.005>>.

UNCTAD. **Review of maritime transport 2024**. 2024. Disponível em: <<https://unctad.org>>. Acesso em: 14 jul. 2025.

VERNIMMEN, B.; DULLAERT, W.; ENGELN, S. **Schedule unreliability in liner shipping: origins and consequences for the hinterland supply chain**. *Maritime Economics & Logistics*, v. 9, p. 193–213, 2007. Disponível em: <<https://doi.org/10.1057/palgrave.mel.9100182>>.

WILMSMEIER, G.; TOVAR, B.; SANCHEZ, R. J. **The evolution of container terminal productivity and efficiency under changing economic environments**. *Research in Transportation Business & Management*, v. 8, p. 50–66, 2013. ISSN 2210-5395. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.rtbm.2013.07.003>>.

World Bank. **The Container Port Performance Index 2022: a comparable assessment of performance based on vessel time in port**. World Bank, Washington, DC, 2023. Acesso em: 16 jul. 2025. Disponível em: <<https://openknowledge.worldbank.org/entities/publication/6a51b12c-77cd-4236-be5b-13e468fe0cca>>.