

Custos Operacionais no Complexo Portuário do Rio Grande/RS: Uma Análise da Influência das Variáveis Climáticas *

Alisson Talys Geraldo Fiorentin,[†] Gibran Da Silva Teixeira,[‡] Márcio Nora Barbosa,[§] Pedro Henrique Soares Leivas,[¶] Rodrigo da Rocha Gonçalves^{||}

Concorrente ao Prêmio Paulo Haddad

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

Resumo

Este estudo quantifica os impactos das paralisações climáticas sobre a eficiência operacional e os custos de oportunidade do Complexo Portuário de Rio Grande no período 2020–2024. Utilizam-se microdados da ANTAQ combinados a registros meteorológicos do INMET. A identificação causal apoia-se em (i) Balanceamento por Entropia (EB), que iguala as características das embarcações afetadas e não afetadas, e (ii) Regressão Linear Ponderada (MQP) com erros-padrão HC3. Os resultados indicam atrasos médios de 15,8 h no Tempo até atracação, 14,3 h na duração da operação e 15,1 h na estadia total, chegando a mais de 25 h nos terminais públicos. A simulação de custos acumulados atinge R\$ 15,6 milhões para Carga Geral (3 446 h paradas) e R\$ 25,9 milhões para Granel Sólido (5 720 h), evidenciando vulnerabilidades distintas. Recomenda-se investir em infraestrutura resiliente, monitoramento meteorológico em tempo real e protocolos de contingência específicos para mitigar atrasos e perdas econômicas.

Palavras-chave: Balanceamento por entropia; Complexo Portuário de Rio Grande; Custo operacional; Eficiência portuária.

Classificação JEL: L91; Q54; C35; R41

*Estudo desenvolvido com o apoio do CNPq, via bolsa de mestrado do primeiro autor, do Ministério do Desenvolvimento da Integração e do Desenvolvimento Regional-MDR através do edital 01/2023 de Economia Azul, e pelo Edital Pesquisador Gaúcho- PqG/FAPERGS 2024.

[†]Mestrando em Economia Aplicada, PPGE-FURG. E-mail: alisson.fiorentin@outlook.com

[‡]Professor do PPGE-FURG. E-mail: tgibran@hotmail.com

[§]Professor do PPGE-FURG. E-mail: marcionorabarbosa@gmail.com

[¶]Professor do PPGE-FURG. E-mail: pedroleivas@furg.br

^{||}Professor do PPGE-FURG. E-mail: rrochagoncalves@gmail.com

Abstract

This paper measures the effects of weather-induced stoppages on operational efficiency and opportunity costs at the Rio Grande Port Complex from 2020 to 2024. We merge operational microdata from ANTAQ with meteorological records from INMET. Causal identification relies on (i) Entropy Balancing (EB) to equalise treated and control vessels and (ii) Weighted Least Squares with HC3 heteroskedastic-robust errors. Average delays reach 15.8 h in waiting-to-berth time, 14.3 h in handling duration and 15.1 h in total port stay, exceeding 25 h at public terminals. Cumulated opportunity costs amount to BRL 15.6 million for General Cargo (3 446 h halted) and BRL 25.9 million for Solid Bulk (5 720 h), highlighting different vulnerability profiles. Findings underscore the need for resilient infrastructure, real-time weather monitoring and cargo-specific contingency protocols to curb delays and economic losses.

Keywords: Entropy Balancing; Operational Cost; Port Efficiency.

JEL Classification: L91; Q54; C35; R41

1 Introdução

A intensificação dos eventos climáticos extremos tem imposto desafios crescentes à eficiência, previsibilidade e sustentabilidade das cadeias logísticas globais. Em particular, a infraestrutura portuária, por sua localização tipicamente costeira e sua elevada dependência de condições operacionais estáveis, apresenta elevada vulnerabilidade a choques exógenos de origem hidrometeorológica. No Brasil, o Complexo Portuário de Rio Grande configura-se como um dos principais corredores de exportação de granéis sólidos e líquidos, além de desempenhar papel logístico central na Região Sul. Sua posição geográfica, em um estuário sujeito a fortes oscilações climáticas como ressacas, ventos intensos e precipitações severas o torna especialmente exposto a paralisações operacionais motivadas por condições climáticas adversas (Izaguirre et al., 2021).

Essas interrupções, por sua vez, não apenas geram custos diretos, associados a atrasos, sobrestadias e remarcações de rotas, como também induzem perdas indiretas relevantes: comprometimento da produtividade portuária, ampliação de custos de pessoal e aumento do consumo de energia e recursos. Tais custos são frequentemente transmitidos ao longo da cadeia de suprimentos, afetando armadores, operadores logísticos e exportadores, com impactos que transcendem a esfera portuária (ANTAQ, GIZ e WayCarbon, 2021).

Embora a literatura internacional venha avançando na quantificação desses impactos com estudos que estimam prejuízos bilionários em terminais portuários dos Estados Unidos, Reino Unido e China, ainda há lacunas metodológicas e empíricas significativas quando se trata do contexto brasileiro. Em geral, tais estudos adotam abordagens paramétricas que não capturam a heterogeneidade dos eventos meteorológicos, tampouco consideram as especificidades ope-

racionais dos terminais nacionais (Nicholls et al., 2008). No Brasil, o trabalho de Teixeira et al. (2024) representa um avanço ao aplicar métodos de pareamento para estimar os custos de paralisações em portos catarinenses. No entanto, carece de extensão para complexos de maior escala e de metodologias mais flexíveis para o balanceamento de características climáticas.

Nesse contexto, o presente estudo propõe uma estratégia metodológica que integra Balanceamento por Entropia (*Entropy Balancing*) e Regressão Linear Ponderada, com o objetivo de estimar os custos econômicos diretos decorrentes de paralisações climáticas no Complexo Portuário de Rio Grande ao longo do período de 2020 a 2024. A identificação causal baseia-se na construção de pesos que equilibram, entre grupos de navios afetados e não afetados, os momentos das distribuições das principais covariáveis meteorológicas precipitação, umidade relativa, temperatura média e velocidade do vento. Com isso, busca-se isolar o impacto médio das paralisações climáticas sobre métricas temporais críticas, como Tempo atracado, Tempo de operação e Tempo de estadia.

O estudo utiliza um painel mensal com microdados de 2020 a 2024, construído a partir de bases oficiais da Agência Nacional de Transportes Aquaviários (ANTAQ) e do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), totalizando aproximadamente 15 mil observações unitárias. A abrangência de cinco anos permite analisar padrões sazonais, tendências interanuais e possíveis mudanças na exposição portuária, inclusive os efeitos de medidas de gestão implementadas após eventos climáticos extremos ocorridos no período.

Este artigo está estruturado da seguinte forma: a Seção 2 revisa a literatura sobre os efeitos das mudanças climáticas nas operações portuárias e as principais abordagens de estimação dos custos de paralisação; a Seção 3 detalha as bases de dados e a estratégia metodológica adotada, com ênfase no uso de Balanceamento por Entropia e regressão ponderada; a Seção 4 apresenta os resultados empíricos e suas implicações para a gestão logística e a formulação de políticas de adaptação; e a Seção 5 oferece as considerações finais, destacando as limitações do estudo e propondo agendas para investigações futuras.

2 Revisão de Literatura

A gestão portuária contemporânea tem incorporado, de maneira crescente, a dimensão das mudanças climáticas em suas estratégias de planejamento e operação. Instalações portuárias, por sua natureza estrutural de longa duração e por estarem localizadas em regiões costeiras, apresentam alta exposição a extremos hidrometeorológicos, o que as torna particularmente vulneráveis a disrupções operacionais (Izaguirre et al., 2021). No caso brasileiro, evidências empíricas com base em séries históricas apontam para um aumento expressivo na frequência de ondas de calor, chuvas intensas e enxurradas, o que reforça a necessidade de internalizar o risco climático nos mecanismos de governança portuária Marengo (2014).

O Sexto Relatório de Avaliação do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC) destaca, entre outras ameaças, a elevação acelerada do nível médio do mar, a intensifi-

cação de tempestades e o aumento da incidência de ondas de calor costeiras. Esses fenômenos elevam substancialmente a probabilidade de danos físicos e paralisações operacionais em terminais marítimos (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2023; Pörtner et al., 2022). Portos situados em deltas ou estuários, como é o caso do Complexo Portuário de Rio Grande, tendem a ser ainda mais suscetíveis a fenômenos como inundações, galgamentos e ressacas (Becker et al., 2013; Leon-Mateos et al., 2021; ANTAQ, GIZ e WayCarbon, 2021).

Em escala global, levantamentos da Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico (OCDE) indicam que, em 2005, mais de 40 milhões de pessoas estavam expostas a inundações costeiras severas, com projeções de crescimento exponencial até 2070, diante de cenários de elevação do nível do mar combinados com a intensificação da urbanização litorânea (Nicholls et al., 2008). Estudos de modelagem de risco sistêmico envolvendo 1320 portos ao redor do mundo estimam que paralisações motivadas por eventos climáticos podem comprometer até US\$ 81 bilhões em comércio e US\$ 122 bilhões em valor adicionado anualmente (Camus et al., 2023), o que ressalta a urgência de internalizar os riscos climáticos na avaliação de investimentos em infraestrutura portuária.

Casos extremos já ilustram o potencial disruptivo desses fenômenos. O furacão Katrina, em 2005, gerou perdas superiores a US\$ 1,7 bilhão em instalações portuárias na Louisiana (Becker et al., 2013), enquanto o furacão Sandy, em 2012, interrompeu as operações no complexo Nova York–Nova Jersey, com prejuízos estimados entre US\$ 30 bilhões e US\$ 50 bilhões (EQECAT, Inc., 2012). No Reino Unido, as enchentes ocorridas entre 2013 e 2014 resultaram em £ 1,3 bilhão em danos diretos (Chatterton et al., 2016). Em contrapartida, no Brasil, eventos extremos como os de novembro de 2008 impactaram severamente o porto de Paranaguá, com prejuízos da ordem de US\$ 350 milhões (APPA, 2009). No Chile, tempestades registradas em 2020 acarretaram perdas superiores a US\$ 345 milhões para o sistema portuário nacional (CAMPORT, 2021).

No âmbito brasileiro, Teixeira et al. (2024) estimaram que cada evento de paralisação climática no Porto de São Francisco do Sul (SC) acarreta, em média, 15 horas de inatividade operacional, com um custo de oportunidade estimado em aproximadamente R\$ 14 milhões em 2021. Embora representem avanço metodológico ao utilizar correspondência de escores de propensão, tais estimativas carecem de generalização para portos de maior porte e de metodologias que permitam flexibilidade na modelagem de distribuições meteorológicas não-paramétricas.

Complementarmente, uma análise bibliométrica recente conduzida por Li et al. (2023) identificou um crescimento acelerado na produção científica voltada à resiliência portuária. No entanto, também apontou lacunas significativas na mensuração de custos de adaptação organizacional como treinamentos e protocolos de contingência e de soluções baseadas na natureza, como a restauração de manguezais. Isso evidencia a pertinência de estudos que não apenas quantifiquem custos marginais de inatividade, mas também comparem estratégias alternativas de adaptação.

A literatura também evidencia que, além dos custos diretos, a variabilidade climática impõe

ineficiências operacionais significativas. Em estudo com 22 portos espanhóis, ventos fortes e ondas elevadas foram associados a uma redução média de 5,3% na eficiência técnica, com repercussões no custo unitário por *Twenty-foot Equivalent Unit* (TEU) (Moura; Botter, 2020). Em terminais australianos, episódios de inatividade operacional implicaram elevação de gastos com horas-extras e maior consumo de combustível, impactando diretamente o *Operational Expenditure* (OPEX) e, por consequência, o frete marítimo (Yang, Z. et al., 2017). No Brasil, a ANTAQ projeta que entre 2030 e 2050 serão necessários aproximadamente US\$ 1,3 bilhão para adaptar 21 portos costeiros à nova realidade climática, sendo o Porto de Rio Grande classificado como o segundo mais exposto ANTAQ, GIZ e WayCarbon (2021).

Para sistematizar os mecanismos causais das paralisações, Izaguirre et al. (2021) propõem uma taxonomia que identifica os principais vetores de ruptura: (i) restrições à manobrabilidade e atracação; (ii) riscos ocupacionais decorrentes de altas temperaturas; (iii) perda de visibilidade durante chuvas intensas; (iv) impedimento à aproximação por ondas elevadas; (v) galgamentos e alagamentos costeiros; (vi) ocorrência de ciclones e tempestades tropicais; e (vii) elevação de marés associadas a tempestades.

Mais recentemente, abordagens probabilísticas têm combinado geradores estocásticos de cenários meteorológicos com metamodelos operacionais, de modo a estimar a probabilidade de paralisações futuras sob diferentes trajetórias climáticas. Zhang et al. (2023), por exemplo, utiliza essas técnicas para prever horas de inatividade e custos associados, mesmo em situações ainda não observadas historicamente. Esses avanços metodológicos contribuem significativamente para o planejamento ex ante de contingência e para a alocação eficiente de recursos voltados à adaptação.

No plano prático, diversas soluções de baixo custo já demonstraram eficácia na mitigação de riscos: entre elas, destacam-se o uso de tintas anticorrosivas em estruturas de cais e a instalação de estações meteorológicas automatizadas para alertas precoces (Ng et al., 2013; Cahoon; Forster; Lee, 2015). Em paralelo, análises de custo-benefício para infraestrutura cinza revelam que intervenções como a elevação de cais e construção de diques podem ser justificáveis economicamente. Estima-se que a elevação de até 1 metro de infraestrutura costeira na Europa possa demandar investimentos entre € 250 milhões e € 1,32 bilhão até 2030, e até € 2,07 bilhões até 2080 (Christodoulou; Christidis, 2018; Wang; Xu; Li, 2017).

Em uma escala mais ampla, organismos internacionais projetam que os custos anuais globais com adaptação climática podem variar entre US\$ 140 bilhões e US\$ 300 bilhões até 2030, atingindo até US\$ 500 bilhões em 2050 (UNFCCC, 2010; McKinsey & Company, 2023). Tais cifras evidenciam a magnitude do esforço financeiro necessário para proteger os portos e outras infraestruturas críticas. Nesse sentido, tornam-se urgentes abordagens integradas de governança, baseadas em parcerias público-privadas e marcos regulatórios específicos para o setor portuário, conforme argumentam Becker et al. (2013) e Winckler et al. (2022).

Por fim, a literatura tem enfatizado a importância de iniciativas colaborativas entre operadores portuários, órgãos públicos e a academia para fortalecer a governança climática. Autores

como Winckler et al. (2022) e Verschuur et al. (2023) destacam a eficácia de estratégias híbridas que combinem infraestrutura cinza como diques e elevação de cais com soluções baseadas na natureza, como a recuperação de ecossistemas costeiros. Tais estratégias não apenas mitigam riscos físicos, mas também geram benefícios ambientais e sociais, estando alinhadas às recomendações do IPCC.

Apesar dos avanços recentes, permanecem lacunas importantes na quantificação precisa dos custos marginais de inatividade operacional, na comparação entre diferentes estratégias de adaptação (organizacional, baseada na natureza ou estrutural) e na aplicação de métodos estatísticos capazes de capturar a complexidade das interações entre variáveis meteorológicas e operacionais. Este estudo visa justamente preencher parte dessas lacunas, ao propor uma metodologia que integra Balanceamento por Entropia e Regressão Linear Ponderada para estimar os custos diretos de paralisações climáticas no Complexo Portuário de Rio Grande, fornecendo evidências robustas que possam subsidiar a formulação de estratégias de resiliência portuária.

3 Metodologia

3.1 Base de dados

Com o objetivo de mensurar os custos de oportunidade impostos por fatores climáticos às operações portuárias, este estudo fundamenta-se em duas bases de dados oficiais. A primeira é o sistema estatístico da ANTAQ (2025), que disponibiliza microdados operacionais referentes ao Complexo Portuário de Rio Grande. A segunda é o Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa (BDMEP), mantido pelo INMET (2025), o qual fornece registros horários das principais variáveis meteorológicas. A integração dessas fontes possibilitou a construção de um painel mensal abrangendo o quinquênio de 2020 a 2024.

Os microdados disponibilizados pela ANTAQ contêm, para cada embarcação, um conjunto abrangente de informações estruturais e operacionais. Entre as variáveis estruturais, destacam-se o tipo de carga transportada, identificador do tipo de porto, tipo de terminal, além de um indicador binário que registra a ocorrência de paralisação por motivos climáticos.

Do ponto de vista operacional, os registros incluem seis métricas temporais expressas em horas: Tempo até atracação (intervalo entre chegada ao porto e início da atracação), Tempo até operação de carga ou descarga, Tempo de operação, Tempo de desatracação, Tempo atracado (do início da operação até a saída) e Tempo de estadia da embarcação no porto. Essas variáveis permitem decompor a permanência do navio em diferentes fases do ciclo logístico portuário, fornecendo base sólida para a mensuração dos efeitos das paralisações climáticas sobre a eficiência operacional.

Adicionalmente, foi incorporada uma variável contínua que mensura o tempo total de paralisação motivada por condições climáticas adversas, com base em registros administrativos de inoperância.

Do BDMEP/INMET, foram extraídas quatro variáveis meteorológicas agregadas em médias mensais: precipitação (mm), temperatura média (°C), umidade relativa (%) e velocidade média do vento (m/s). Essas variáveis são utilizadas exclusivamente na etapa de regressão ponderada, não sendo incluídas na construção dos pesos no balanceamento por entropia.

Importante destacar que os valores climáticos correspondem ao período efetivo de permanência da embarcação no porto, sendo calculados com base na janela de atracação individual de cada navio isto é, desde a data e hora de chegada até a data e hora de desatracação. Essa granularidade temporal permite uma aproximação mais realista das condições meteorológicas enfrentadas por cada operação logística durante sua estadia no terminal.

Tabela 1: Estatísticas descritivas das variáveis utilizadas.

Variável	Obs.	Média	Mediana	Mín.	Máx.
Ano	15.143	2022	2022	2020	2024
Mês	15.143	6	–	1	12
Movimentação (t)	15.143	13.085,66	4.325,55	1,85	111.203,40
Parada Climática (0/1)	15.143	–	–	0	1
Porto Público (0/1)	15.143	–	–	0	1
Terminais	15.143	–	–	1	3
Tipo de Carga (1–4)	15.143	–	3	1	4
Tempo até atracação (h)	15.143	46,92	2,75	0	792,75
Tempo até operação (h)	15.143	5,05	2,25	0	794,42
Tempo de operação (h)	15.143	32,34	15,58	0	789,67
Tempo de desatracação (h)	15.143	4,63	2,20	0,02	739,58
Tempo de estadia (h)	15.143	88,95	37,25	1,83	814,67
Tempo atracado (h)	15.143	42,03	23,00	1,25	813,83
Tempo de Paralisação	15.143	0,84	0	0	751,92
Precipitação (mm)	15.143	5,27	0,09	0	161,90
Umidade (%)	15.143	77,61	78,16	33,76	99,34
Velocidade do Vento (m/s)	15.143	1,73	1,68	0,25	5,60
Temperatura (°C)	15.143	19,04	19,33	5,41	31,42

Fonte: Elaboração própria.

A variável Tempo de estadia definida como o intervalo entre a entrada e a saída da embarcação é amplamente utilizada como métrica de eficiência temporal portuária (Ducruet; Itoh; Merk, 2014). No contexto brasileiro, sua decomposição operacional, conforme proposta por (Santanna, 2019), contempla: (i) Tempo até atracação , (ii) Tempo até operação , (iii) Tempo de operação , e (iv) Tempo de desatracação . A soma dos itens (ii) a (iv) é frequentemente chamada de Tempo atracado , abrangendo o período desde o início até a conclusão das operações de carga ou descarga.

A Tabela 1 revela acentuada heterogeneidade nas operações portuárias do Complexo entre 2020 e 2024. A movimentação média de carga (≈ 13.085 t) é substancialmente superior à mediana (≈ 4.326 t), sinalizando a ocorrência de operações atípicas de grande escala. Métricas

temporais como Tempo de estadia e Tempo até atracação exibem forte assimetria, com valores médios elevados frente a medianas modestas. A variável de paralisação climática, embora apresente valor mediano nulo, pode atingir até 751,92 horas, demonstrando que, apesar de pouco frequentes, os eventos climáticos podem gerar inatividade prolongada. As variáveis meteorológicas também evidenciam distribuição assimétrica, com médias moderadas e valores máximos potencialmente críticos.

Dadas essas características forte assimetria, caudas longas e predominância de zeros, justifica-se a adoção de estratégias de modelagem que combinem balanceamento não paramétrico e inferência ponderada. Neste trabalho, opta-se pela aplicação do Balanceamento por Entropia (EB) (Hainmueller, 2012; Källberg; Waernbaum, 2023), incorporando as quatro variáveis climáticas e suas transformações (quando aplicável) ao vetor de covariáveis \mathbf{X}_i , seguido de Regressão Linear Ponderada por Mínimos Quadrados (MQP) para estimar o Efeito Médio do Tratamento sobre os Tratados (ATT), com erros-padrão robustos (HC3) e ajustes por *cluster* ao nível da embarcação.

3.2 Estratégia de identificação

A identificação do efeito médio do tratamento sobre os tratados (ATT) neste estudo segue uma estratégia metodológica em duas etapas complementares. Inicialmente, aplica-se o Balanceamento por Entropia (*Entropy Balancing*, EB), conforme a formulação original de Hainmueller (2012) e seus desdobramentos recentes em Källberg e Waernbaum (2023). O EB é implementado exclusivamente sobre o conjunto de covariáveis operacionais e estruturais relacionadas à embarcação e ao terminal: movimentação de carga (em termos linear e quadrático), dummies para o tipo de carga, indicador de operação em porto público e, quando apropriado, interações sazonais.

Essa primeira etapa garante que o grupo de controle ponderado reproduza, de forma exata, os momentos estatísticos (médias e, opcionalmente, variâncias) do grupo tratado para as covariáveis em questão, eliminando viés de seleção proveniente de desequilíbrios observáveis.

Na segunda etapa, estima-se ATT por meio de um modelo de Regressão Linear Ponderada por Mínimos Quadrados Ponderados (MQP), utilizando os pesos gerados pelo EB. Esse modelo incorpora, além das covariáveis utilizadas no balanceamento, terminais, variáveis meteorológicas precipitação acumulada, temperatura média, umidade relativa e velocidade média do vento bem como dummies sazonais, com o objetivo de capturar efeitos temporais latentes e oscilações não observadas entre períodos.

A estimação dos parâmetros é realizada com erros-padrão robustos à heterocedasticidade, segundo o estimador HC3, e os erros são ajustados por *cluster* ao nível da embarcação, conferindo consistência mesmo em presença de correlações intra-grupo. Dessa forma, a combinação entre Balanceamento por Entropia e Regressão Linear Ponderada proporciona uma estimativa não viesada e eficiente do ATT, assegurando validade interna para a inferência dos efeitos de

paralisações climáticas nas operações portuárias do Complexo de Rio Grande.

3.2.1 Balanceamento por Entropia

O Balanceamento por Entropia (EB) tem por objetivo atribuir pesos às unidades de controle de forma que as distribuições das covariáveis operacionais e estruturais se tornem estatisticamente equivalentes entre grupos tratado e controle, ao menos nos momentos escolhidos (tipicamente, médias e variâncias), sem a necessidade de especificar uma forma funcional para o escore de propensão (Hainmueller, 2012).

Seja $T_i \in \{0, 1\}$ o indicador de tratamento para cada unidade $i = 1, \dots, N$. Definem-se os subconjuntos:

$$\mathcal{T} = \{i : T_i = 1\}, \quad \mathcal{C} = \{i : T_i = 0\}, \quad N_{\mathcal{T}} = |\mathcal{T}|, \quad N_{\mathcal{C}} = |\mathcal{C}|.$$

Seja $\mathbf{X}_i = (X_{i1}, \dots, X_{iK})'$ o vetor de K covariáveis relevantes (movimentação de carga, dummies de tipo de carga, indicador de porto público, dummies de terminal e, eventualmente, interações sazonais). Para cada função $b_k(\cdot)$ representando o k -ésimo momento da distribuição (por exemplo, $b_k(\mathbf{X}_i) = X_{ik}$ ou $(X_{ik} - \bar{X}_k)^2$), define-se o alvo de balanceamento:

$$\mu_k = \frac{1}{N_{\mathcal{T}}} \sum_{i \in \mathcal{T}} b_k(\mathbf{X}_i), \quad \text{para } k = 1, \dots, K.$$

A atribuição dos pesos $w_i \geq 0$ para as unidades do grupo de controle ($i \in \mathcal{C}$) advém da solução do seguinte problema de minimização da divergência de Kullback-Leibler:

$$\min_{\{w_i\}} \sum_{i \in \mathcal{C}} w_i \ln \left(\frac{w_i}{q_i} \right) \quad \text{sujeito a} \quad \sum_{i \in \mathcal{C}} w_i = N_{\mathcal{C}}, \quad \sum_{i \in \mathcal{C}} w_i b_k(\mathbf{X}_i) = N_{\mathcal{C}} \mu_k, \quad \forall k,$$

onde $q_i = 1$ são pesos uniformes de base. A solução ótima assume a forma exponencial:

$$w_i^* = \exp \left(\gamma_0 + \sum_{k=1}^K \gamma_k b_k(\mathbf{X}_i) \right),$$

sendo os multiplicadores γ_k determinados de modo a satisfazer as restrições de momentos.

Reescalonamento dos pesos Para que a soma dos pesos de controle seja igual ao tamanho do grupo tratado, reescalamos os pesos conforme:

$$\tilde{w}_i = \begin{cases} w_i^* \cdot \frac{N_{\mathcal{T}}}{N_{\mathcal{C}}}, & \text{se } i \in \mathcal{C}, \\ 1, & \text{se } i \in \mathcal{T}, \end{cases}$$

o que assegura $\sum_{i \in \mathcal{C}} \tilde{w}_i = N_T$ e preserva a igualdade dos momentos:

$$\sum_{i \in \mathcal{C}} \tilde{w}_i b_k(\mathbf{X}_i) = \sum_{i \in \mathcal{T}} b_k(\mathbf{X}_i) = N_T \mu_k.$$

Dessa forma, o EB fornece um vetor de pesos $\{\tilde{w}_i\}$ que iguala exatamente os momentos do grupo tratado, dispensando modelagem paramétrica do escore de propensão e mitigando viés de confundimento observável (Wooldridge, 2020).

O Balanceamento por Entropia apresenta diversas vantagens metodológicas que justificam sua aplicação no presente estudo. Em primeiro lugar, destaca-se sua capacidade de realizar o balanceamento exato de momentos, uma vez que o método impõe, por construção, que as médias (e, se desejado, também as variâncias) das covariáveis no grupo de controle ponderado sejam exatamente iguais às do grupo tratado, eliminando assim a necessidade de ajustes iterativos típicos de modelos baseados em escores de propensão (Hainmueller, 2012).

Além disso, por adotar como critério de otimização a maximização da entropia (ou minimização da divergência de Kullback-Leibler), o método tende a gerar pesos próximos ao padrão uniforme, contribuindo para a *preservação da eficiência amostral* e evitando a concentração excessiva de peso em poucas observações (Wooldridge, 2020).

A versatilidade do EB constitui outro ponto forte: os pesos gerados podem ser incorporados diretamente a diferentes tipos de estimadores subsequentes, como diferenças ponderadas de médias, regressões lineares com ou sem efeitos fixos e modelos interativos (Greene, 2018).

Por fim, deve-se observar que, em bases de dados com baixa sobreposição entre grupos tratado e controle, podem surgir pesos extremos. Nesses casos, recomenda-se a realização de diagnósticos gráficos (como histogramas, boxplots ou estimativas de densidade kernel dos pesos) e, quando necessário, a aplicação de estratégias de regularização, como truncamento de pesos muito elevados, para garantir a robustez da inferência.

3.2.2 Regressão Linear Ponderada por Mínimos Quadrados

Uma vez realizado o reequilíbrio não-paramétrico das covariáveis por meio do Balanceamento por Entropia (EB), estima-se de forma paramétrica o Efeito Médio do Tratamento sobre os Tratados (ATT), denotado por τ , por meio da Regressão Linear Ponderada por Mínimos Quadrados (MQP). A aplicação direta dos pesos $\{\tilde{w}_i\}$ gerados pelo EB assegura o controle simultâneo de covariáveis contínuas e categóricas, permitindo a incorporação de efeitos fixos (por exemplo, de tempo ou sazonalidade), e combinando a robustez do balanceamento com a flexibilidade da modelagem paramétrica (Wooldridge, 2020).

Seja Y_i a variável de desfecho de interesse para a unidade i , considera-se o seguinte modelo linear:

$$Y_i = \alpha + \tau T_i + \mathbf{z}_i' \boldsymbol{\beta} + \varepsilon_i, \quad i = 1, \dots, N, \quad (1)$$

em que $T_i \in \{0, 1\}$ representa o indicador de tratamento, \mathbf{z}_i é o vetor das covariáveis utilizadas

na etapa de EB (incluindo transformações e dummies sazonais), $\boldsymbol{\beta}$ é o vetor de coeficientes associados a essas covariáveis, e ε_i denota o termo de erro idiossincrático.

Assume-se que a variância do erro seja inversamente proporcional ao peso atribuído, i.e.,

$$\text{Var}(\varepsilon_i) = \sigma^2 / \tilde{w}_i.$$

Definindo-se $W = \text{diag}(\tilde{w}_1, \dots, \tilde{w}_N)$ como a matriz diagonal dos pesos, a estimação por MQP corresponde à solução do seguinte problema de mínimos quadrados ponderados:

$$\hat{\boldsymbol{\theta}}_{\text{MQP}} = \arg \min_{\boldsymbol{\theta}} (Y - X\boldsymbol{\theta})'W(Y - X\boldsymbol{\theta}), \quad X = [\mathbf{1} \mid T \mid \mathbf{z}], \quad (2)$$

cuja solução analítica é dada por:

$$\hat{\boldsymbol{\theta}}_{\text{MQP}} = (X'WX)^{-1}X'WY. \quad (3)$$

O coeficiente $\hat{\tau}$, extraído de $\hat{\boldsymbol{\theta}}_{\text{MQP}}$, representa a estimativa pontual do ATT.

Graças ao balanceamento exato fornecido pelo EB, o termo \mathbf{z}_i é, por construção, equivalente entre tratados e controles ponderados. Assim, pelo Teorema de Frisch–Waugh–Lovell, o estimador de τ pode ser interpretado como uma diferença ponderada de médias:

$$\hat{\tau}_{\text{MQP}} = \frac{1}{N_T} \sum_{i \in \mathcal{T}} Y_i - \frac{1}{N_T} \sum_{i \in \mathcal{C}} \tilde{w}_i Y_i.$$

Quando a heterocedasticidade for corretamente especificada como $\text{Var}(\varepsilon_i) \propto 1/\tilde{w}_i$, o estimador MQP é o Melhor Estimador Linear Não-Viesado (BLUE). Em casos em que essa condição não se verifica, mantém-se a consistência do estimador, desde que a especificação do modelo esteja correta. Em ambas as situações, a inferência deve ser conduzida com erros-padrão robustos (por exemplo, estimadores HC3), preferencialmente com ajuste por *cluster* ao nível da embarcação, assegurando validade estatística em presença de correlação intra-grupo (Wooldridge, 2020; Greene, 2018).

A combinação entre Balanceamento por Entropia e Regressão Linear Ponderada apresenta um conjunto de propriedades vantajosas. Primeiramente, o EB assegura o balanceamento não-paramétrico das covariáveis, evitando a necessidade de modelagem explícita do escore de propensão. Em seguida, a MQP permite a modelagem paramétrica do resultado, facilitando a inclusão de variáveis contínuas, categóricas e efeitos fixos. Por fim, o estimador integrado $\hat{\tau}$ é consistente em geral, e atinge eficiência ótima (BLUE) quando a heterocedasticidade é bem especificada como função inversa dos pesos.

Dessa forma, a estratégia EB + MQP combina robustez metodológica, flexibilidade empírica e validade inferencial, qualificando-se como abordagem recomendada para a avaliação de efeitos causais em contextos observacionais com covariáveis assimétricas e potencial heterogeneidade estrutural entre grupos.

4 Resultados

Esta seção apresenta os principais achados empíricos da análise, organizados em três frentes complementares: (i) diagnóstico do balanceamento das covariáveis operacionais por meio do *Entropy Balancing*; (ii) estimativa dos efeitos das paralisações climáticas sobre os tempos logísticos das operações portuárias, com base em modelos de Regressão Linear Ponderada por MQP; e (iii) simulação dos custos de oportunidade decorrentes das paralisações, tanto por tipo de carga quanto por ano, com ênfase no Porto Público de Rio Grande. Embora 2024 concentre os eventos mais severos, toda a inferência baseia-se no painel 2020–2024.

4.1 Diagnóstico do Balanceamento por Entropia

Para assegurar a validade interna das estimativas, iniciamos o diagnóstico pelo exame das diferenças padronizadas de médias (*Standardized Mean Differences*) antes (Diff.Un) e após (Diff.Adj) a aplicação do *Entropy Balancing*. A Tabela 2 evidencia que, em todas as seis covariáveis operacionais analisadas, as discrepâncias de média ajustadas ficaram abaixo do limiar conservador de 0,1, atendendo aos critérios recomendados na literatura para comparabilidade entre os grupos tratado e controle (Hainmueller, 2012). Tal resultado indica que o EB igualou de forma eficaz não apenas os níveis médios das covariáveis, mas também reduziu potenciais vieses de confundimento originados por desequilíbrios prévios.

Tabela 2: Medidas de balanceamento antes e após Entropy Balancing.

Covariável	Tipo	Diff.Un	Diff.Adj	M.Threshold
mov_P1	Contínua	0,439	0,001	Balanced, < 0.1
mov_P2	Contínua	-0,354	0,001	Balanced, < 0.1
D_publico	Binária	0,348	0,002	Balanced, < 0.1
D_carga1	Binária	-0,230	-0,003	Balanced, < 0.1
D_carga2	Binária	0,147	0,002	Balanced, < 0.1
D_carga4	Binária	0,262	0,003	Balanced, < 0.1

Fonte: Elaborado pelos autores.

Em termos absolutos, as maiores diferenças iniciais foram observadas nos componentes polinomiais de movimentação, mov_P1 ($|Diff.Un| \approx 0,433$) e mov_P2 ($|Diff.Un| \approx 0,349$), as quais foram completamente eliminadas após o balanceamento ($Diff.Adj \approx 0,0001$). Tal grau de ajuste é crucial para a credibilidade do contrafactual ponderado, pois minimiza a influência de características estruturais distintas entre os grupos na estimação do efeito das paralisações climáticas.

A Tabela 3 resume os principais momentos estatísticos da distribuição dos pesos atribuídos às 13.780 unidades de controle. Observa-se uma forte assimetria positiva, com média dos pesos (0,099) superior à mediana (0,041), indicando que, embora a maioria das unidades receba pesos baixos, um subconjunto menor mais semelhante às unidades tratadas concentra valores

mais elevados. Tal comportamento é característico do método e, dentro de limites razoáveis, desejável. Ademais, o percentil 95 (0,411) encontra-se suficientemente afastado do máximo (0,935), sinalizando a ausência de pesos excessivamente extremos que possam comprometer a estabilidade da inferência.

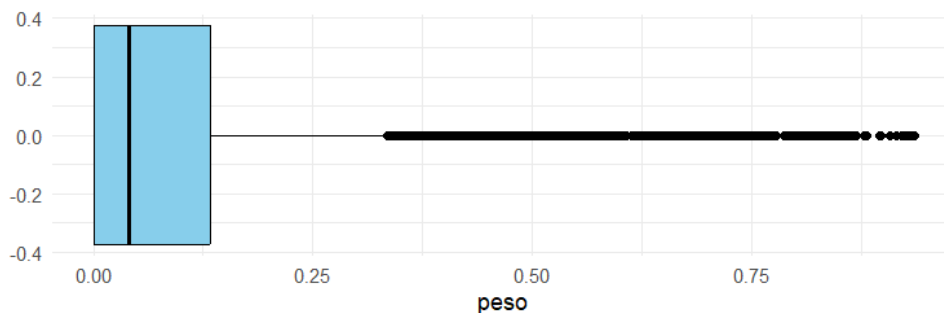
Tabela 3: Sumário e quantis dos pesos de controle (EB) — forma transposta.

	Mínimo	1º Quartil	Mediana	Média	3º Quartil	Máximo
Valor	$2,858 \times 10^{-5}$	$1,203 \times 10^{-4}$	0,04105	0,09896	0,13360	0,93510

Fonte: Elaborado pelos autores.

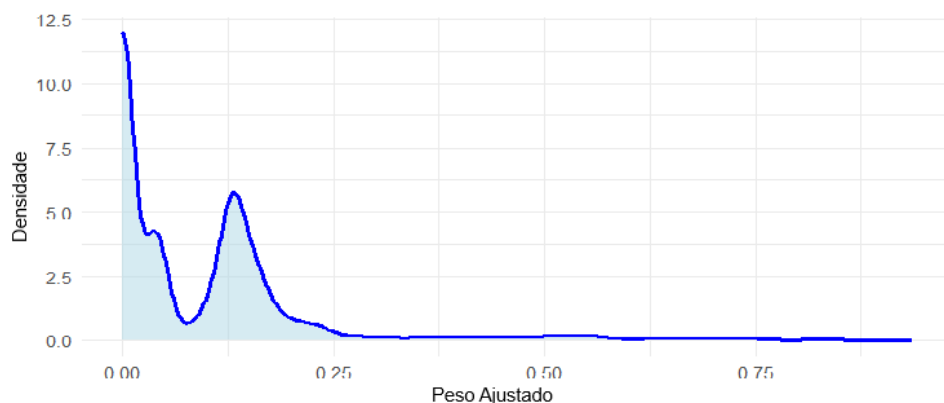
O *Effective Sample Size* (ESS) estimado para o grupo de controle é de aproximadamente 4.458,1 unidades, o que corresponde a 32,4% da amostra original de 13.780 observações. A redução do tamanho amostral efetivo reflete a maior variância introduzida pelos pesos no processo de balanceamento um custo inevitável da correção de desequilíbrios substantivos nas covariáveis observadas. Tal comprometimento é amplamente compensado pelo aumento da validade interna da estimativa de efeito causal.

Figura 1: Boxplot dos pesos atribuídos às unidades de controle após Entropy Balancing.



Fonte: Elaborado pelos autores.

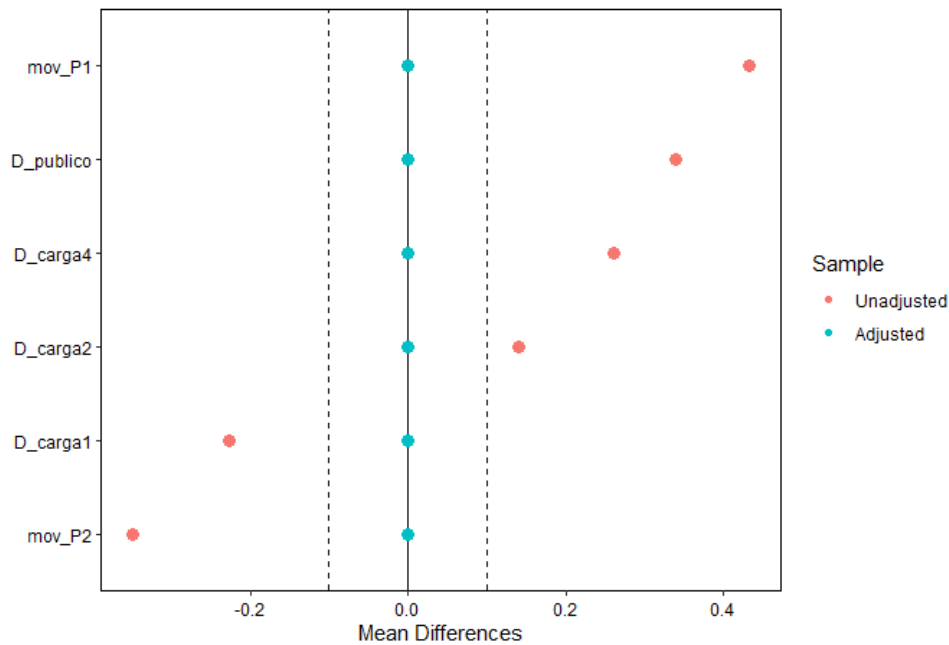
Figura 2: Densidade Kernel dos pesos atribuídos às unidades de controle após *Entropy Balancing*.



Fonte: Elaborado pelos autores.

A Figura 1 apresenta o boxplot dos pesos estimados via Entropy Balancing, evidenciando sua concentração em baixos valores e ausência de dispersão extrema. Já a Figura 2 exibe a função densidade estimada por Kernel, destacando a assimetria positiva da distribuição e a presença de uma cauda longa à direita padrão típico em situações de baixa sobreposição entre os grupos. Ambas as representações reforçam a adequação estatística do balanceamento, ao indicar que os pesos atribuídos mantêm estabilidade e não comprometem a eficiência das inferências subsequentes.

Figura 3: Love Plot: diferenças padronizadas de médias antes (laranja) e após (azul) o balanceamento.



Fonte: Elaborado pelos autores.

O Love Plot apresentado na Figura 3 sintetiza visualmente o desempenho do balanceamento. Todas as diferenças padronizadas de médias e variâncias situam-se nitidamente abaixo do limiar de 0,1, evidenciando o sucesso do EB tanto no nivelamento de médias quanto na equiparação das dispersões. Em conjunto, os resultados validam a aplicação do *Entropy Balancing* como pré-processamento eficaz para a estimação do efeito das paralisações climáticas sobre os tempos logísticos portuários, mitigando vieses de seleção e assegurando a comparabilidade entre os grupos analisados.

4.2 Impacto das Paralisações Climáticas nos Tempos Portuários

Com base nos pesos derivados do *Entropy Balancing*, foram estimados seis modelos de Regressão Linear Ponderada por MQP, com erros-padrão robustos do tipo HC3, a fim de mensurar o impacto do indicador parada_climática sobre diferentes métricas temporais associadas às operações logísticas portuárias. A Tabela 4 apresenta os coeficientes associados ao tratamento

(paralisação), permitindo uma comparação direta entre os diferentes cenários investigados.

Tabela 4: Efeitos das Paralisações Climáticas nos tempos logísticos por cenários (MQP, HC3)

Métrica	Geral	Porto Público		
		Todos	Carga Geral	Granel Sólido
Tempo até atracação (h)	15,80 ^{***}	22,32 ^{***}	15,45 ^{***}	12,67 ^{***}
Tempo até operação (h)	0,26	0,96 [*]	0,35	-0,12
Tempo de operação (h)	14,31 ^{***}	20,28 ^{***}	14,34 ^{***}	11,33 ^{***}
Tempo de desatracação (h)	1,23 [*]	1,08 ^{***}	0,76	1,46 [·]
Tempo de estadia (h)	15,09 ^{***}	25,38 ^{***}	17,71 ^{**}	7,87 [·]

Significância: ^{***} $p < 0,01$, ^{**} $p < 0,05$, ^{*} $p < 0,10$, [·] $p < 0,15$.

Fonte: Elaborado pelos autores.

No cenário agregado, Geral, os resultados indicam que as paralisações climáticas impõem um acréscimo médio de 15,80 horas no Tempo até atracação, 14,31 horas na duração das operações e 15,09 horas no Tempo de estadia da embarcação (todos os coeficientes com $p < 0,01$). Há ainda um efeito marginalmente significativo sobre o Tempo de desatracação, com aumento de 1,23 hora ($p < 0,10$). Ao restringir a análise ao Porto Público, Todos, os efeitos tornam-se ainda mais pronunciados: o Tempo até atracação eleva-se em 22,32 horas, a duração da operação aumenta em 20,28 horas e o Tempo de estadia cresce 25,38 horas (todos com $p < 0,01$).

A desagregação por tipo de carga no Porto Público revela heterogeneidade relevante. Nas operações de Carga Geral, observam-se atrasos substanciais: aumento de 15,45 horas no Tempo até atracação, 14,34 horas na duração da operação e 17,71 horas na estadia total (com $p < 0,01$ e $p < 0,05$, respectivamente). Já no segmento de Granel Sólido, os efeitos são ligeiramente mais atenuados: 12,67 horas adicionais para atracação e 11,33 horas para operação (ambos com $p < 0,01$), além de um aumento marginal de 7,87 horas no Tempo de estadia ($p < 0,15$).

Em síntese, os resultados empíricos indicam que os efeitos das paralisações climáticas sobre os tempos logísticos são economicamente relevantes e estatisticamente significativos, especialmente nos terminais públicos. A magnitude dos atrasos varia conforme o tipo de carga, o que reforça a necessidade de estratégias de adaptação diferenciadas e específicas para cada segmento operacional, com vistas a mitigar perdas de eficiência e reduzir os custos de oportunidade decorrentes da inatividade portuária.

4.3 Análise de Custos por Área Operacional do Porto Público

A avaliação dos custos de oportunidade gerados por eventos climáticos pode ser refinada ao alocar os impactos estimados aos setores físicos específicos do Porto Público, de acordo com sua vocação operacional predominante. A Tabela 5 apresenta uma simulação desse tipo de alocação, estimando o custo de oportunidade por evento climático para as áreas operacionais agrupadas segundo os principais tipos de carga: Carga Geral e Granel Sólido. A simulação

considera tanto o número de berços dedicados a cada segmento quanto o atraso médio estimado a partir dos modelos econométricos aplicados ao Porto Público.

Tabela 5: Custo de Oportunidade por Evento Climático por Tipo de Carga (2024)

Perfil	Nº de Berços	Atraso Médio (h)*	Custo de Oportunidade (R\$)
Carga Geral	2	14,3	R\$129.366,56
Granel Sólido	4	11,3	R\$204.453,45

Fonte: Elaborado pelos autores com base na estimativa de receita horária de Teixeira et al. (2024), atualizada para 2024 com base no IPCA.

Os resultados indicam que a área dedicada ao Granel Sólido associada, majoritariamente, ao escoamento de produtos como grãos, madeira e fertilizantes a granel responde pela maior parcela do custo de oportunidade por evento, com aproximadamente R\$204,5 mil em 2024. Tal valor decorre, em grande parte, da maior quantidade de berços alocados (quatro) e da elevada intensidade operacional característica do segmento, cuja logística é fortemente sensível a paralisações.

Por outro lado, a área de Carga Geral que abrange operações com contêineres, celulose e veículos (via sistema Ro-Ro) apresenta custo estimado de R\$129,4 mil por evento climático. Apesar de o atraso médio ser mais elevado nesse segmento (14,3 horas por atracação), o menor número de berços dedicados (dois) reduz o impacto financeiro agregado. Esses achados evidenciam a necessidade de diferenciar estratégias de adaptação conforme a natureza e a criticidade econômica de cada área operacional.

Adicionalmente, a Tabela 6 apresenta os custos acumulados de oportunidade para o Porto Público de Rio Grande ao longo do quinquênio 2020–2024, calculados a partir do total de horas de paralisação de cada segmento de carga e da receita marginal horária média. Esta última foi originalmente estimada por Teixeira et al. (2024) em R\$ 4.369,50 (ano-base 2021) e posteriormente atualizada pela variação do IPCA até o respectivo período analisado.

Tabela 6: Custos acumulados de oportunidade no Porto Público de Rio Grande (2020–2024)

Segmento de Carga	Horas Totais Paradas	Receita Média por Hora (R\$)	Custo Total (R\$)
Carga Geral	3.445,66	4.521,42	15.579.284,89
Granel Sólido	5.719,92	4.521,42	25.891.418,74

Fonte: Elaborado pelos autores.

No segmento de Carga Geral, a elevada quantidade de horas paradas evidencia a sensibilidade das operações a variações climáticas e logísticas, resultando em custos significativos (R\$ 15,6 milhões) ao longo do período analisado. Já o Granel Sólido apresenta custos ainda mais elevados (R\$ 25,9 milhões), reflexo de um volume maior de paralisações (5.720 h) e de maior vulnerabilidade operacional a eventos extremos.

Em síntese, os resultados desta subseção confirmam que os eventos climáticos geram perdas financeiras expressivas e desiguais entre as áreas operacionais do Porto Público. Para reduzir

tais custos de oportunidade, o complexo pode adotar um conjunto de ações complementares: (i) implantar um sistema de monitoramento meteorológico em tempo real integrado ao planejamento de atracação, permitindo o reescalonamento dinâmico de berços antes que as condições se deteriore; (ii) estabelecer janelas operacionais flexíveis com equipes de prontidão e contratos laborais contingentes para acelerar a retomada das atividades logo após o fim das paralisações; (iii) investir em infraestrutura resiliente específica a cada segmento, como coberturas móveis para terminais de Carga Geral e sistemas de contenção de pó e drenagem para áreas de Granel Sólido; (iv) criar rotas logísticas alternativas dentro do próprio complexo (p. ex., uso de píeres secundários durante ressacas) e acordos de reciprocidade com portos vizinhos para redirecionar navios em situações críticas; e (v) adotar indicadores-chave de desempenho (KPIs) voltados à eficiência climática associando metas de redução de horas paradas a incentivos para operadores e terminais. A combinação dessas medidas tende a diminuir atrasos, melhorar a previsibilidade das operações e, conseqüentemente, mitigar os impactos econômicos verificados ao longo do quinquênio.

5 Considerações Finais

Este trabalho quantificou, em base causal, os efeitos das paralisações climáticas sobre a eficiência do Complexo Portuário do Rio Grande no período 2020–2024. A combinação de Balanceamento por Entropia, que reduziu todas as diferenças padronizadas entre grupos para menos de 0,1, com Regressão Linear Ponderada robusta, permitiu isolar o impacto médio do tratamento climático sobre indicadores críticos de desempenho. Cada interrupção acrescentou, em média, 22,3 h ao Tempo até atracação, 20,3 h à duração da operação e 25,4 h ao Tempo de estadia, valores que permanecem estatisticamente significativos mesmo após controles sazonais.

A heterogeneidade por tipo de carga é marcante. O segmento de Granel Sólido acumula 5 720 h de paralisação, o que se traduz em um custo de oportunidade de R\$ 25,9 milhões, enquanto a Carga Geral, com 3 446 h paradas, gera um dispêndio de R\$ 15,6 milhões. A maior exposição do granel deriva não apenas do número superior de berços dedicados (quatro contra dois), mas também da elevada taxa de utilização desses berços: cada hora indisponível afeta uma fila mais longa de navios e retarda contratos de exportação de commodities sensíveis a janelas sazonais. Os coeficientes estimados para granel sólido (12,7 h extras de espera + 11,3 h de operação) mantêm significância ao nível de 1 % mesmo quando se introduzem dummies sazonais e interações com velocidade média do vento, reforçando a robustez do achado.

Esses resultados reforçam que, sem medidas mitigadoras, eventos climáticos extremos comprometem de forma relevante a competitividade do porto. Uma estratégia de adaptação integrada deve combinar o reforço físico de infraestruturas sensíveis como cais, defensas e sistemas de drenagem com a implantação de monitoramento meteorológico em tempo real ligado ao planejamento de atracações, além da definição de protocolos de contingência específicos para Carga Geral e Granel Sólido que contemplem equipes de prontidão, contratos laborais flexíveis e pro-

cedimentos de retomada rápida. A coordenação com portos vizinhos para o redirecionamento de navios em cenários críticos, bem como a criação de indicadores de desempenho que associem metas de redução de horas paradas a incentivos para operadores, completa o arcabouço de governança recomendado. A adoção articulada dessas ações tende a diminuir atrasos, conferir maior previsibilidade ao ciclo logístico e reduzir significativamente os custos de oportunidade identificados, preservando a sustentabilidade econômica do Complexo diante da intensificação dos eventos climáticos.

Referências

ANTAQ. *Painel Estatístico Aquaviário*. 2025. Acesso em: 01 abr. 2025. Disponível em: <<https://web3.antaq.gov.br/ea/sense/index.html>>. Nenhuma citação no texto.

ANTAQ, GIZ e WayCarbon. *Avaliação de Riscos Climáticos nos Portos Públicos Costeiros Brasileiros – Fase 2: Estudos de Caso em Santos, Aratu e Rio Grande*. Brasília, 2021. Projeto realizado em parceria com GIZ e WayCarbon. Disponível em: <<https://www.antaq.gov.br/index.php/publicacoes/>>. Nenhuma citação no texto.

APPA. *Relatório de Avaliação dos Impactos das Chuvas de 2008 nas Operações do Porto de Paranaguá*. Paranaguá, 2009. Documento interno. Disponível em: <<https://www.portosdoparana.pr.gov.br>>. Nenhuma citação no texto.

Becker, A. H. et al. A note on climate change adaptation for seaports: a challenge for global ports, a challenge for global society. *Climatic Change*, v. 120, n. 4, p. 683–695, 2013. Nenhuma citação no texto.

Cahoon, S.; Forster, C.; Lee, A. *Guidelines for Port-Based Meteorological Monitoring and Early-Warning Systems*. London, 2015. IMO Technical Report. Nenhuma citação no texto.

CAMPORT. *Impacto Económico de las Interrupciones Operacionales Portuarias por Eventos Meteorológicos Extremos*. Santiago, 2021. Relatório técnico. Disponível em: <<https://www.camport.cl/estudios/>>. Nenhuma citação no texto.

Camus, P. et al. Global exposure of maritime trade to climate-induced port disruptions. *Environmental Research Letters*, v. 18, n. 7, p. 074021, 2023. Nenhuma citação no texto.

Chatterton, J. et al. *The costs and impacts of the winter 2013 to 2014 floods*. 2016. Report SC140025. Nenhuma citação no texto.

Christodoulou, A.; Christidis, P. Climate change impacts on the freight transport sector: A review of EU-funded research. *Sustainability*, v. 10, n. 10, p. 3669, 2018. Nenhuma citação no texto.

Ducruet, C.; Itoh, H.; Merk, O. *Time Efficiency at World Container Ports*. Paris, 2014. Disponível em: <<https://www.itf-oecd.org/sites/default/files/docs/dp201408.pdf>>. Nenhuma citação no texto.

EQECAT, Inc. *Post-Event Report: Superstorm Sandy, October 22–31, 2012*. Oakland, CA, 2012. Economic and insured losses assessment. Nenhuma citação no texto.

Greene, W. H. *Econometric Analysis*. 8. ed. Harlow: Pearson, 2018. Nenhuma citação no texto.

Hainmueller, J. Entropy balancing for causal effects: A multivariate reweighting method to produce balanced samples in observational studies. *Political Analysis*, v. 20, n. 1, p. 25–46, 2012. Nenhuma citação no texto.

INMET. *Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa (BDMEP)*. 2025. Acesso em: 08 abr. 2025. Disponível em: <<https://bdmep.inmet.gov.br/>>. Nenhuma citação no texto.

Intergovernmental Panel on Climate Change. *Sixth Assessment Report: Synthesis Report*. 2023. IPCC, Geneva. Nenhuma citação no texto.

Izaguirre, C. et al. Climate change risk to global port operations. *Nature Climate Change*, v. 11, n. 8, p. 699–703, 2021. Nenhuma citação no texto.

Källberg, D.; Waernbaum, I. Large sample properties of entropy balancing estimators of average causal effects. *Econometrics and Statistics*, 2023. Available online 30 November 2023. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2452306223000813>>. Nenhuma citação no texto.

Leon-Mateos, F. et al. Adapting our seaports to the challenges of climate change: Development of a port resilience index. *Marine Policy*, v. 130, p. 104573, 2021. Nenhuma citação no texto.

Li, D. et al. Supply chain resilience from the maritime transportation perspective: A bibliometric analysis and research directions. *Fundamental Research*, 2023. In press. Nenhuma citação no texto.

Marengo, J. A. Climate change and extreme events in Brazil. *Revista USP*, n. 103, p. 25–32, 2014. Nenhuma citação no texto.

McKinsey & Company. *Building Coastal Resilience: Investing in Infrastructure Adaptation*. New York, 2023. Report. Disponível em: <<https://www.mckinsey.com/coastal-resilience-2023>>. Nenhuma citação no texto.

Moura, J. L.; Botter, R. C. The effect of weather conditions on port technical efficiency. *Journal of Transport Geography*, v. 88, p. 102831, 2020. Nenhuma citação no texto.

Ng, A. K. Y. et al. Climate change and the adaptation strategies of ports: The Australian experiences. *Research in Transportation Business & Management*, v. 8, p. 186–194, 2013. Nenhuma citação no texto.

Nicholls, R. J. et al. *Ranking Port Cities with High Exposure and Vulnerability to Climate Extremes: Exposure Estimates*. [S.l.], 2008. Disponível em: <<https://doi.org/10.1787/011766488208>>. Nenhuma citação no texto.

Pörtner, H.-O. et al. (Ed.). *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability*. Cambridge: Cambridge University Press, 2022. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Disponível em: <<https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg2/>>. Nenhuma citação no texto.

Santanna, V. P. *Infraestrutura portuária no Brasil: uma análise do impacto do tempo dos procedimentos portuários sobre as exportações brasileiras*. Tese (Tese de Doutorado) — Universidade de São Paulo, São Paulo, 2019. Nenhuma citação no texto.

Teixeira, G. d. S. et al. Mudanças climáticas e os custos gerados ao setor portuário: O caso de um porto no sul do Brasil. In: ANPEC. *Anais do Encontro Regional Sul da ANPEC 2024*. 2024. p. 1–20. Disponível em: <https://www.anpec.org.br/sul/2024/submissao/files_I/i4-38fc87969fdab0d9572ee4e6a7f48aa2.pdf>. Nenhuma citação no texto.

UNFCCC. *Investment and Financial Flows to Address Climate Change*. 2010. Technical Paper FCCC/TP/2010/7. Disponível em: <<https://unfccc.int/resource/docs/2010/tp/07.pdf>>. Nenhuma citação no texto.

Verschuur, J. et al. Multi-hazard risk to global port infrastructure and resulting trade and logistics losses. *Communications Earth & Environment*, v. 4, n. 1, p. 5, 2023. Nenhuma citação no texto.

Wang, X.; Xu, P.; Li, J. Cost–benefit analysis of coastal defense structures under sea-level rise. *Coastal Engineering*, v. 125, p. 23–33, 2017. Nenhuma citação no texto.

Winckler, H. et al. Validation and application of the port resilience index to Latin-American seaports. *Marine Policy*, v. 138, p. 104979, 2022. Nenhuma citação no texto.

Wooldridge, J. M. *Econometric Analysis of Cross Section and Panel Data*. 3. ed. Cambridge: MIT Press, 2020. Nenhuma citação no texto.

Yang, Z. et al. Risk and cost evaluation of port adaptation measures to climate change impacts. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, v. 61, p. 444–458, 2017. Nenhuma citação no texto.

Zhang, L. et al. Probabilistic modeling of port downtime under climate change scenarios. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, v. 99, p. 103012, 2023. Nenhuma citação no texto.