

Evolução da Produtividade em Terminais de Granel Sólido Brasileiros: Uma Análise DEA Dinâmica com Índice de Malmquist (2015–2024)

Paula de Castro Kruly Ywata^{a,†}

^aInstituto Brasileiro de Ensino, Desenvolvimento e Pesquisa (IDP), Brazil • [†]Autor correspondente: paulakruly@gmail.com

INFORMAÇÕES DO ARTIGO

Palavras-chave:

Eficiência portuária
Granel sólido
DEA dinâmica
Índice de Malmquist
Produtividade

RESUMO

Este estudo mensura e analisa a evolução da produtividade dos terminais brasileiros de granel sólido entre 2015 e 2024, empregando a Análise Envoltória de Dados (DEA) dinâmica com o Índice de Produtividade de Malmquist. A partir das bases públicas de atracções e movimentação de cargas da ANTAQ, construiu-se um painel de 33 terminais especializados, decompondo a variação da produtividade total dos fatores em mudança de eficiência técnica (*catch-up*) e mudança tecnológica (*frontier shift*). Os resultados, validados por meio de *bootstrap* com 1.000 replicações, indicam que a produtividade agregada permaneceu estatisticamente estável ao longo do período, com Índice de Malmquist médio próximo da unidade. As variações observadas decorrem majoritariamente de ganhos de eficiência operacional, enquanto a fronteira tecnológica manteve-se praticamente estagnada. Verifica-se, ainda, elevada heterogeneidade entre os terminais e forte volatilidade temporal, com retração acentuada em 2022–2023 e recuperação expressiva em 2023–2024.

1. Introdução

A eficiência operacional dos terminais portuários desempenha papel central na competitividade do comércio exterior, na integração logística e na produtividade das cadeias de suprimentos. Em economias dependentes da exportação de *commodities*, como é o caso do Brasil, a performance dos terminais de granéis sólidos é particularmente relevante, pois estes segmentos respondem por parcela expressiva do fluxo total movimentado no país e influenciam diretamente custos logísticos, tempos de ciclo e a inserção internacional dos produtos nacionais. A literatura internacional reforça essa importância ao mostrar que portos eficientes contribuem para menor custo de transporte, maior fluidez logística e melhor desempenho econômico agregado (Périco e da Silva, 2020). De forma complementar, estudos mais recentes, como Wang et al. (2022), destacam que a mensuração consistente da eficiência e da produtividade dos terminais é um insumo essencial para decisões de investimento, formulação de políticas públicas e priorização de estratégias de modernização portuária.

No contexto brasileiro, a necessidade de avaliações sistemáticas torna-se ainda mais evidente diante da heterogeneidade estrutural dos terminais, da diversidade de perfis operacionais e da relevância crescente dos granéis sólidos (minérios, grãos e fertilizantes) no comércio exterior. Além disso, a disponibilidade de bases de dados públicas da Agência Nacional de Transportes Aquaviários (ANTAQ), cobrindo informações detalhadas de atracções e movimentação de cargas, cria oportunidade inédita de mensurar eficiência e evolução tecnológica com granularidade e rigor, permitindo análises dinâmicas que superam abordagens meramente estáticas. Apesar disso, a literatura nacional ainda apresenta lacunas na avaliação longitudinal da produtividade de terminais especializados em granéis sólidos, sobretudo quando se consideram mudanças tecnológicas, variações ao longo do tempo e especificidades operacionais da infraestrutura portuária brasileira.

Diante desse cenário, o presente trabalho propõe mensurar e analisar a evolução da produtividade de terminais de granéis sólidos no Brasil no período de 2015 a 2024, utilizando a abordagem DEA Dinâmica com Índice de Produtividade de Malmquist. A proposta central consiste em investigar se os terminais especializados nesse segmento apresentam ganhos de produtividade ao longo do tempo, identificando se tais mudanças decorrem de: (i) melhorias internas de eficiência (*catch-up*), associadas ao melhor uso da infraestrutura existente; ou (ii) deslocamentos da fronteira tecnológica (*frontier shift*), ligados a modernização, inovação operacional ou expansão de capacidade. Assim, o problema de pesquisa que orienta o estudo pode ser formulado da seguinte maneira: como evoluiu a produtividade dos terminais brasileiros de granel sólido na última década, e quais fatores (eficiência técnica ou mudança tecnológica) explicam essa evolução?

A hipótese de pesquisa que guia o trabalho é que a produtividade dos terminais não cresce de forma uniforme no período. Espera-se observar fases distintas, condicionadas por choques macroeconômicos, ciclos de investimento, mudanças regulatórias e eventos extraordinários. Adicionalmente, supõe-se que a maior parte das alterações na produtividade resulte de oscilações na eficiência técnica, enquanto avanços tecnológicos tendem a ocorrer de forma mais lenta e gradual, conforme sugerido tanto pela literatura internacional quanto por evidências preliminares do setor.

O objetivo geral da pesquisa é quantificar a evolução da produtividade total dos fatores dos terminais de graneis sólidos no Brasil ao longo de 2015–2024. Como objetivos específicos, pretende-se: (i) identificar padrões temporais, ciclos de expansão e retração, e períodos de ruptura estrutural; e (ii) comparar o desempenho relativo entre terminais ao longo do tempo.

Ao combinar dados reais provenientes das bases de atracções e cargas da ANTAQ com técnicas modernas de análise de produtividade, este estudo contribui para atualizar dados da literatura nacional e oferece subsídios robustos para a compreensão da dinâmica operacional dos terminais brasileiros de graneis sólidos.

A seção seguinte apresenta uma breve revisão da literatura do tema, seguida da metodologia detalhada deste estudo, apresentação e discussão dos resultados e, por fim, a conclusão do trabalho.

2. Revisão da Literatura

A literatura sobre eficiência portuária tem utilizado amplamente a Análise Envoltória de Dados (DEA) como ferramenta para avaliar a eficiência de portos e terminais diante de múltiplos insumos (*inputs*) e produtos (*outputs*). No Brasil, Cabral e Ramos (2018) aplicaram DEA a 44 terminais de contêineres, identificando que cerca de metade deles apresentava infraestrutura superdimensionada e que o porte do terminal está fortemente associado à eficiência operacional, ainda que o estudo seja restrito a um único ano e a um único tipo de carga.

De forma complementar, da Costa et al. (2021) analisaram terminais de contêineres na região Norte, reforçando que fatores estruturais como profundidade, equipamentos e ritmo operacional condicionam fortemente o desempenho, mas novamente dentro de uma abordagem estritamente estática e voltada ao segmento de contêineres.

Ampliando o escopo para portos generalistas, Périgo e da Silva (2020) aplicaram DEA aos 24 maiores portos brasileiros entre 2010 e 2017, incorporando variáveis operacionais como tempos de espera e atrasos, elementos críticos no contexto nacional. Apesar da amplitude temporal, seu enfoque permaneceu estático, estimando a eficiência ano a ano sem recorrer a medidas dinâmicas de produtividade ou decomposições de mudança tecnológica. Em âmbito internacional, Quintano et al. (2020) utilizaram DEA para avaliar a eficiência de grandes portos europeus, propondo uma formulação cuidadosa das variáveis de trabalho, mas igualmente limitada a um único ano de análise (2016). Já Wang et al. (2022) combinam DEA com o Índice de Produtividade de Malmquist em uma abordagem dinâmica de duas etapas, permitindo analisar mudanças na eficiência e tecnologia ao longo do tempo. Embora metodologicamente avançado, o estudo se aplica a um contexto distinto, não ao setor brasileiro de graneis sólidos, e foca em aspectos operacionais específicos, diferindo substancialmente da proposta do presente trabalho.

A literatura brasileira que analisa eficiência portuária por meio de DEA mostra avanços importantes. Kirchner e Lucas (2018) aplicaram DEA e o índice de Malmquist para terminais de contêineres, identificando variações temporais relevantes, mas focam exclusivamente nesse segmento e utilizam uma janela curta de análise intertemporal. Barros et al. (2012) analisaram portos públicos brasileiros com um Malmquist com viés tecnológico, concluindo que, entre 2004 e 2010, houve ganhos de eficiência, porém acompanhados de deterioração tecnológica, o que revela heterogeneidade estrutural no sistema portuário nacional. Por fim, da Silva et al. (2011) empregaram DEA e Malmquist para avaliar eficiência pós-Lei dos Portos, encontrando oscilações intertemporais de eficiência, mas ausência de mudança tecnológica significativa, além de utilizarem dados agregados por natureza de carga, sem distinções operacionais mais detalhadas.

Em conjunto, esses estudos mostram a consolidação do uso de DEA e Malmquist no contexto brasileiro, porém nenhum deles examina exclusivamente terminais de graneis sólidos em um painel longo, o que reforça a relevância e originalidade da abordagem adotada no presente trabalho, que se propõe a aplicar DEA dinâmica (Índice de Malmquist) para quantificar a evolução da produtividade de terminais brasileiros de graneis sólidos entre 2015 e 2024, distinguindo ganhos de eficiência técnica e de mudanças tecnológicas.

3. Metodologia

3.1. Dados

Os dados utilizados nesta análise provêm de duas bases de dados públicas da ANTAQ: a base de atracções e a base de movimentação de cargas. A base de atracções registra cada operação de atracção de embarcações nos terminais portuários brasileiros, incluindo informações sobre o terminal (código CDTUP, nome, complexo portuário), a data da operação, o berço utilizado (identificador único), o tipo de navegação (Longo Curso, Cabotagem ou Interior), e o tipo de operação realizada. A base de cargas, por sua vez, detalha a movimentação de cargas em cada atracção, registrando o peso movimentado em toneladas, a natureza da carga (Carga Containerizada, Granel Sólido, Granel Líquido e Gasoso, ou Carga Geral), e a quantidade de contêineres em TEU (*Twenty-foot Equivalent Unit*). Estas duas bases são vinculadas através de um identificador único de atracção, permitindo a construção de um painel completo de movimentações portuárias ao longo do tempo.

A análise emprega um conjunto de dados em painel cobrindo o período de 2015 a 2024. Terminais com dados incompletos foram excluídos da análise para garantir comparabilidade entre períodos.

Os terminais foram classificados em cinco grupos principais com base no perfil de movimentação de cargas: (i) *Container* (Containerizado), para terminais especializados em movimentação de contêineres; (ii) *Solid Bulk* (Granel Sólido), para terminais especializados em graneis sólidos como minérios, grãos e fertilizantes; (iii) *Liquid Bulk* (Granel Líquido), para terminais especializados em graneis líquidos e gasosos, incluindo petróleo e derivados; (iv) *General Cargo* (Carga Geral), para terminais que movimentam predominantemente carga geral solta, como veículos e produtos siderúrgicos; e

(v) *Multi-cargo* (Múltiplas Cargas), para terminais que movimentam dois ou mais tipos de carga de forma significativa, sem predominância clara de um único tipo. Neste estudo, foram utilizados apenas dados dos terminais classificados como *Solid Bulk* (Granel Sólido).

3.2. DEA Dinâmica com Índice de Malmquist

Este estudo emprega a Análise Envoltória de Dados (DEA) Dinâmica com o Índice de Produtividade de Malmquist para avaliar a evolução da produtividade de terminais de granel sólido em portos brasileiros no período de 2015 a 2024. A análise utiliza uma abordagem orientada a produto (*output*) sob a suposição de Retornos Variáveis de Escala (VRS), implementada através do pacote *Benchmarking* em R (Bogetoft e Otto, 2011).

O modelo DEA orientado a *output* maximiza os produtos mantendo os insumos constantes, o que é particularmente apropriado para terminais portuários onde a capacidade de infraestrutura é relativamente fixa no curto e médio prazo, mas a movimentação pode variar significativamente. A especificação VRS permite a identificação de efeitos de escala e é mais adequada para terminais de tamanhos variados.

O Índice de Produtividade de Malmquist (MI) mede a mudança na produtividade total dos fatores ao longo do tempo através do cálculo da razão de funções distância, e pode ser decomposto em mudança tecnológica (deslocamento da fronteira ou *frontier shift* – FS) e mudanças de eficiência (aproximação à fronteira, ou *catch-up* – CU). A relação multiplicativa $IM = CU \times FS$ permite a interpretação de que a mudança total de produtividade resulta tanto da melhoria na eficiência (alcançando a fronteira) quanto da inovação tecnológica (deslocando a fronteira).

$$MI_0^{t,t+1} = \left[\frac{D_0^{t+1}(x^{t+1}, y^{t+1})}{D_0^t(x^t, y^t)} \times \frac{D_0^t(x^t, y^t)}{D_0^{t+1}(x^t, y^t)} \cdot \frac{D_0^t(x^{t+1}, y^{t+1})}{D_0^{t+1}(x^{t+1}, y^{t+1})} \right]^{1/2} \quad (1)$$

onde D_0^t representa a função distância de eficiência técnica no período t .

3.3. Insumos e Produtos

Para terminais de granel sólido, a especificação do modelo foi adaptada para refletir a natureza especializada de suas operações:

Insumos:

- **Número de berços:** capacidade de infraestrutura física medida pelo número de berços disponíveis no terminal.
- **Capacidade de tamanho de navio:** o percentil 98 do peso de carga simples manuseado por navio, escalonado por 1.000 toneladas, servindo como *proxy* para a capacidade do terminal de acomodar grandes navios.
- **Intensidade operacional:** número de atracações de navios no terminal, escalonado por 100, representando a frequência das operações do terminal.

Produtos:

- **Movimentação de granel sólido:** peso total de carga de granel sólido movimentado, escalonado por 1.000 toneladas.

3.4. Tratamento de Dados e Robustez

Para garantir a robustez dos resultados, aplicou-se o método de *super-efficiency* para identificar potenciais *outliers* capazes de distorcer a fronteira de eficiência. Adicionalmente, foram identificados e removidos *missing values* no índice de Malmquist e em seus componentes, uma vez que esses casos refletem a impossibilidade de calcular a variação intertemporal, geralmente devido à ausência de informações completas para anos consecutivos, interrupções operacionais ou inconsistências nos registros da ANTAQ. A remoção desses terminais assegura que os resultados reflitam apenas observações válidas e economicamente interpretáveis.

Para suavizar flutuações de curto prazo e revelar tendências subjacentes na evolução da produtividade, foi aplicada uma média móvel geométrica com janela de três anos. Esta técnica permite identificar padrões de longo prazo ao reduzir a volatilidade causada por variações pontuais entre anos consecutivos.

Na agregação dos índices entre terminais e períodos, utilizou-se a média geométrica do MI, o que é consistente com a formulação clássica proposta por Färe et al. (1994). Os autores definem o Malmquist como o valor da média geométrica de duas medidas alternativas do índice, mostrando que sua estrutura é intrinsecamente multiplicativa. Além disso, ao resumir os resultados empíricos, os autores afirmam explicitamente que os valores médios reportados ao longo do período analisado são médias geométricas, por ser essa a forma correta de sintetizar séries de índices multiplicativos de produtividade.

Adicionalmente, foram calculados índices cumulativos através do produto encadeado de mudanças entre períodos consecutivos. Estes índices cumulativos permitem rastrear a evolução da produtividade total de longo prazo desde o ano base de 2015, revelando o efeito composto das mudanças anuais ao longo da década analisada.

3.5. Análise de Bootstrap

Para avaliar a robustez estatística dos resultados da análise Malmquist, foi implementada uma análise de *bootstrap* com 1.000 replicações. O método de *bootstrap* reamostra os terminais com reposição, criando novas amostras da mesma dimensão da amostra original, e recalcula os índices de Malmquist para cada replicação.

Para cada replicação *bootstrap*, são calculadas as médias geométricas dos índices de Malmquist (MI), eficiência (CU) e mudança tecnológica (FS) entre todos os terminais e pares de anos. Em seguida, são construídos intervalos de confiança

de 95% (percentis 2,5% e 97,5%) para cada índice, permitindo avaliar a variabilidade estatística dos resultados e a significância das mudanças observadas na produtividade dos terminais.

Esta abordagem *bootstrap* é particularmente útil no contexto da DEA, onde os índices de Malmquist podem apresentar variabilidade significativa devido à natureza não-paramétrica do método e ao tamanho limitado da amostra de terminais eficientes em cada período analisado.

4. Resultados e Discussão

Os valores do Índice de Malmquist são interpretados da seguinte forma:

- $MI > 1$: melhoria de produtividade (crescimento positivo da produtividade);
- $MI = 1$: nenhuma mudança de produtividade;
- $MI < 1$: declínio de produtividade (crescimento negativo da produtividade).

A mesma interpretação se aplica aos componentes de mudança de eficiência (CU) e mudança tecnológica (FS).

4.1. Caracterização da Amostra e Estatísticas Descritivas

A amostra continha originalmente 40 terminais que apresentavam dados completos para o período entre 2015 e 2024. Para identificação de *outliers* foi inicialmente utilizado o método *Jackstrap*, mas este não pôde identificar *outliers* devido ao tamanho pequeno da amostra. Foi, então, utilizado o método *super-efficiency*, que não identificou nenhum *outlier* entre os DMUs da amostra. Após o cálculo do Índice de Malmquist, seis terminais foram removidos por *missing values* neste índice, ficando então a amostra final com 33 DMUs (295 observações, considerando todos os anos do painel).

A Tabela 1 sintetiza as estatísticas descritivas das mudanças anuais de produtividade. Como já mencionado na seção de metodologia, na agregação dos índices entre terminais e períodos utilizou-se a média geométrica em vez da média aritmética, pois a média geométrica preserva adequadamente as propriedades de taxas de crescimento e razões, enquanto a média aritmética tenderia a superestimar os valores quando há grande dispersão nos dados.

Considerando os dados analisados neste estudo, o MI apresentou média de 1,04, sugerindo uma melhoria anual média de aproximadamente 4% na produtividade. O componente de eficiência técnica (CU) exibiu média de 1,07, indicando avanço médio de cerca de 7% na eficiência relativa dos terminais, enquanto o componente de mudança tecnológica (FS) registrou média de 0,98, sugerindo um leve retrocesso tecnológico agregado ao longo do período estudado.

Tabela 1. Estatísticas Descritivas das Mudanças Anuais de Produtividade.

Estatística	MI	CU	FS
N	295	295	295
Média	1,04	1,07	0,98
Desvio-padrão	0,46	0,51	0,08
Mín	0,19	0,19	0,64
1º Quartil (Q1)	0,93	0,93	0,95
Mediana (Q2)	0,99	1,00	0,99
3º Quartil (Q3)	1,08	1,11	1,03
Máx	5,84	6,84	1,39
% Ganhos (>1)	46,10	44,41	46,44
% Perdas (<1)	53,90	37,63	53,56

Fonte: Elaboração própria com dados ANTAQ.

A frequência dos resultados revela que 46,10% das observações apresentam MI acima de 1, enquanto 53,90% encontram-se abaixo de 1, indicando leve predominância de declínios de produtividade. Observa-se padrão semelhante nos componentes: 44,41% das observações apresentam CU superior a 1, enquanto 46,44% possuem FS acima de 1. Em conjunto, esses resultados sugerem que o comportamento dos terminais é amplamente assimétrico, com presença simultânea de trajetórias de crescimento e declínio, sem prevalência clara de um padrão único. A discrepância entre a média elevada de CU (1,07) e a média inferior a 1 observada no componente tecnológico (0,98) indica que o modesto avanço da produtividade global no período é explicado sobretudo por ganhos operacionais, isto é, pela capacidade de determinados terminais se aproximarem da fronteira eficiente, enquanto o deslocamento dessa fronteira, associado à mudança tecnológica, permaneceu praticamente estagnado. Contudo, a análise de *bootstrap* apresentada a seguir indica que o MI permanece estatisticamente próximo de 1, o que sugere que a produtividade agregada permaneceu estável, sem evidência robusta de avanço ao longo do período.

4.1.1. Intervalos de Confiança via Bootstrap

Para avaliar a robustez estatística das estimativas apresentadas na Tabela 1, foram calculados intervalos de confiança por meio de um procedimento de *bootstrap* com 1.000 replicações. Os resultados, resumidos na Tabela 2, indicam que a média do MI permanece estatisticamente próxima da unidade, com limites entre 0,97 e 1,02, sugerindo que as variações anuais agregadas de produtividade são modestas e cercadas por relativa incerteza. O componente de eficiência (CU) apresenta limites entre 0,98 e 1,05, reforçando que, embora alguns terminais tenham registrado avanços operacionais

significativos, a média geral revela ganhos pequenos, porém estatisticamente consistentes. Já a mudança tecnológica (FS), cujos limites variam entre 0,97 e 1,02, confirma que não houve deslocamento tecnológico sistemático na fronteira de eficiência ao longo da década. Em conjunto, os intervalos de confiança corroboram a interpretação de que a evolução da produtividade no setor é dominada por oscilações operacionais e não por avanços tecnológicos estruturais.

Tabela 2. Estimativas *bootstrap* dos índices de produtividade (2015–2024).

Replicações	Média MI	IC (MI)	Média CU	IC (CU)	Média FS	IC (FS)
1000	1,00	0,97–1,02	1,01	0,98–1,05	0,99	0,97–1,02

Fonte: Elaboração própria com dados ANTAQ.

4.2. Evolução Temporal da Produtividade

A Tabela 3 apresenta a evolução dos índices de produtividade ao longo dos subperíodos, permitindo identificar diferentes fases na dinâmica do setor. O período 2015–2016 apresenta MI médio de 1,04, caracterizando um crescimento leve da produtividade, sustentado por um CU de 1,12 e um FS de 0,93. Nos períodos subsequentes, entre 2016 e 2018, observa-se uma fase de estagnação seguida de leve declínio, com MI igual a 0,96 em 2016–2017 e novamente 0,96 em 2017–2018. Essa reversão coincide com a lenta recuperação da economia brasileira e evidencia que, nesse intervalo, tanto a eficiência técnica quanto a mudança tecnológica apresentaram desempenho limitado (FS de 0,95 e 0,91, respectivamente).

Tabela 3. Evolução Temporal dos Índices de Produtividade (2015–2024).

Período	MI (média)	CU (média)	FS (média)
2015–2016	1,04	1,12	0,93
2016–2017	0,96	1,01	0,95
2017–2018	0,96	1,05	0,91
2018–2019	1,04	1,02	1,02
2019–2020	1,01	1,00	1,01
2020–2021	0,96	0,95	1,01
2021–2022	1,02	1,00	1,02
2022–2023	0,89	0,88	1,01
2023–2024	1,12	1,15	0,97

Fonte: Elaboração própria com dados ANTAQ.

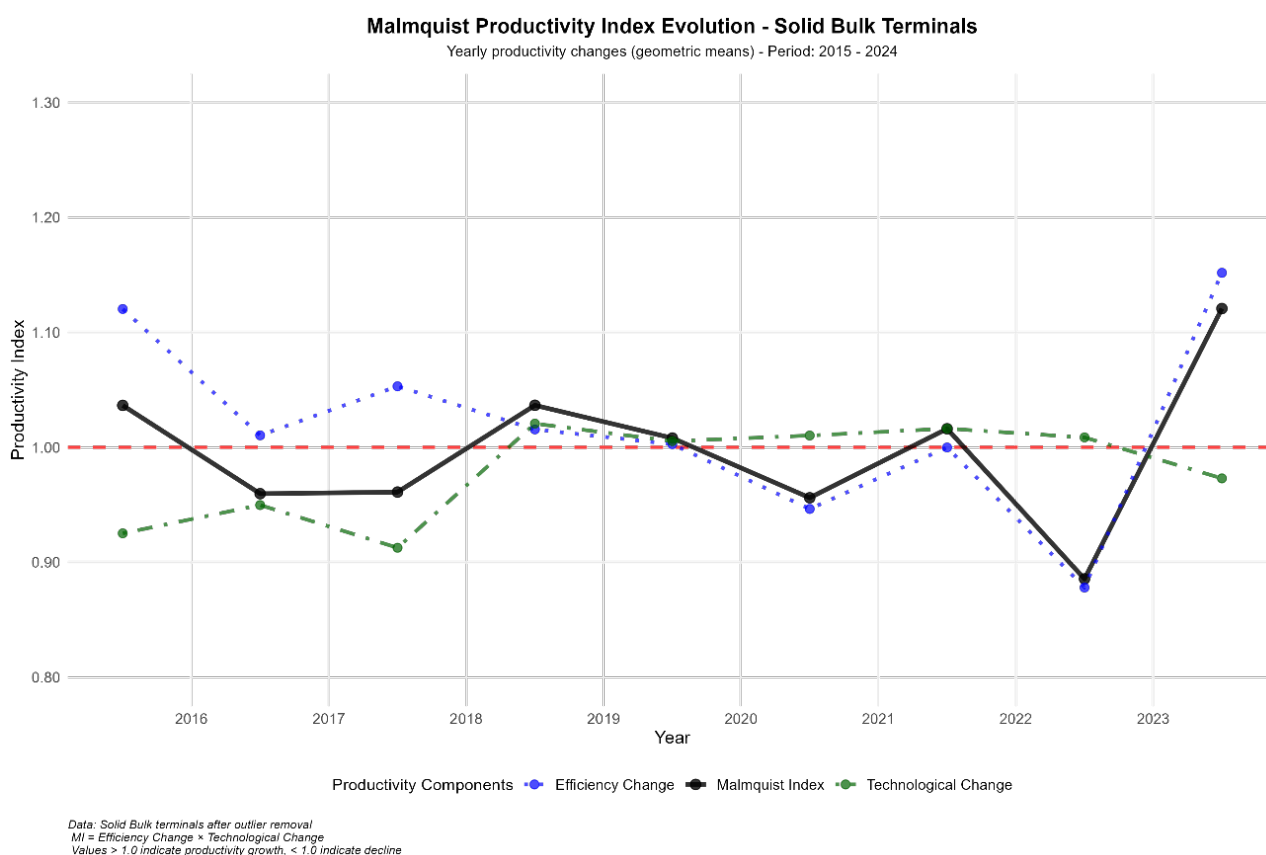
Entre 2018 e 2020 ocorre uma recuperação moderada. O MI cresce para 1,04 em 2018–2019 e mantém-se próximo da neutralidade em 1,01 em 2019–2020, embora o ritmo permaneça abaixo do observado antes de 2016. O componente tecnológico apresenta comportamento relativamente estável nesses dois anos, com FS de 1,02 e 1,01, indicando que não houve avanços significativos na fronteira tecnológica do setor.

A fase seguinte, entre 2020 e 2023, é marcada por deterioração do desempenho. O período 2020–2021 apresenta MI de 0,96, refletindo os efeitos das restrições operacionais e logísticas impostas pela pandemia de COVID-19. Em 2021–2022, o índice melhora e supera ligeiramente a neutralidade, com MI de 1,02, mas volta a cair de forma expressiva em 2022–2023, alcançando o pior resultado da série, com MI igual a 0,89, o que representa uma queda de aproximadamente 11% na produtividade.

Vale notar que o período 2022–2023 coincide com um momento de elevada instabilidade macroeconômica no Brasil, marcado por inflação persistente, taxas de juros em patamar elevado, pressão sobre os custos de produção (incluindo insumos e energia) e desaceleração do crédito e dos investimentos. Conforme detalhado pela Confederação Nacional da Indústria ([Confederação Nacional da Indústria, 2022](#)), o cenário combinou desaceleração da atividade industrial, custos ainda elevados e incertezas fiscais, fatores que podem ter afetado negativamente a movimentação e a eficiência operacional dos terminais de grãos sólidos.

Considerando o período mais recente, 2023–2024, observa-se forte recuperação, com MI igual a 1,12, representando aumento de aproximadamente 12% na produtividade. Essa retomada está associada principalmente a ganhos de eficiência técnica, cujo CU alcança 1,15, enquanto o FS permanece ligeiramente abaixo da unidade (0,97). Portanto, a partir dos valores corrigidos, conclui-se que a recuperação recente do setor decorre fundamentalmente de ajustes operacionais, e não de incremento tecnológico.

A Figura 1 sintetiza visualmente a evolução anual dos índices de produtividade, destacando a dinâmica conjunta da mudança de eficiência (CU), da mudança tecnológica (FS) e do índice de Malmquist (MI) ao longo de 2015–2024. Observa-se que os movimentos descritos na Tabela 3, como a queda entre 2016–2017, a recuperação em 2018–2019 e a retração acentuada em 2022–2023, são refletidos de forma clara nas séries temporais, reforçando a interpretação das oscilações operacionais e tecnológicas discutidas nesta subseção.

Figura 1. Evolução Temporal do Índice de Produtividade de Malmquist e seus Componentes (2015–2024).

Fonte: Elaboração própria com dados ANTAQ.

4.3. Ranking de Performance Cumulativa

A Tabela 4 apresenta o ranking cumulativo dos terminais de acordo com o Índice de Malmquist acumulado no período de 2015 a 2024. Os resultados revelam elevada heterogeneidade no desempenho de longo prazo. O terminal Granel Química Ladário ocupa a primeira posição, com MI cumulativo igual a 3,21, equivalente a um crescimento acumulado de 220,76%. Esse desempenho excepcional é impulsionado predominantemente por ganhos de eficiência técnica, dado que seu CU cumulativo é 3,39, enquanto o FS (0,95) indica leve retrocesso tecnológico ao longo do período.

Tabela 4. Ranking de Produtividade com Índice de Malmquist Cumulativo (2015–2024).

Posição	Terminal	MI Cum.	CU Cum.	FS Cum.	Variação (%)
1	Granel Química Ladário	3,21	3,39	0,95	220,76
2	Terminal Ponta da Montanha	2,72	3,58	0,76	172,10
3	TERMISA	2,29	2,99	0,77	128,86
4	Oleoplan	1,51	2,29	0,66	51,00
5	Yara Brasil Fertilizantes	1,41	2,00	0,71	41,39
6	CAIS Navegantes – Entre Gates	1,36	1,86	0,73	36,33
7	Terminal Trombetas	1,25	1,00	1,25	24,70
8	Porto Gregório Curvo	1,17	1,48	0,79	16,81
9	Terminal Marítimo Gerdau	1,11	1,17	0,94	10,64
10	Vale Praia Mole	1,09	1,00	1,09	8,98
11	Terminal da Ilha Guaíba – TIG	1,08	1,25	0,87	8,15
12	Porto Sudeste do Brasil S/A	1,06	1,31	0,80	5,67
13	Sepetiba	1,05	1,48	0,71	5,29
14	Cargill Agrícola	1,02	1,00	1,02	2,22
15	Terminal Graneleiro Hermasa	1,02	1,40	0,73	1,80
16	Terminal Fluvial de Juruti	1,02	0,93	1,10	1,74
17	Porto Bertolini Cujubim	1,02	0,75	1,36	1,53
18	Terminal Portuário Privativo da Alumar	1,01	1,42	0,71	0,85
19	TMIB	0,93	1,29	0,72	–7,17
20	Terminal Integrador Portuário Luiz Antonio Mesquita – TIPLAM	0,92	1,07	0,87	–7,53
21	Terminal de Tubarão	0,89	1,50	0,60	–10,94
22	Terminal Portuário Cotegipe	0,86	1,07	0,80	–13,72
23	Terbian – Terminal Bianchini	0,86	1,20	0,71	–13,97
24	Terminal da Bunge Miritituba	0,84	1,00	0,84	–16,45
25	Porto do Açú – Terminal de Minério	0,81	0,99	0,81	–19,32
26	Ponta da Madeira	0,80	1,00	0,80	–20,00
27	Amaggi Portochuelo	0,77	1,03	0,75	–22,59
28	Terminal Marítimo Luiz Fogliatto – Termasa	0,63	0,61	1,03	–37,18
29	Terminal Portuário Bunge Alimentos	0,62	0,90	0,70	–37,67
30	TERFRON	0,48	0,67	0,71	–52,42
31	Macapá	0,42	0,50	0,85	–57,62
32	T03 – STM 04	0,42	0,57	0,73	–58,35
33	TMULT	0,26	0,22	1,18	–74,08

Fonte: Elaboração própria com dados ANTAQ.

Na segunda posição encontra-se o Terminal Ponta da Montanha, com MI igual a 2,72 e crescimento acumulado de 172,10%. Assim como o líder, seu desempenho é essencialmente explicado pela expansão da eficiência operacional, refletida no CU cumulativo de 3,58, ao passo que o FS igual a 0,76 evidencia deterioração tecnológica. Em seguida, TERMISA ocupa a terceira posição, com MI igual a 2,29, representando crescimento acumulado de 128,86%. O terminal apresenta CU de 2,99, reforçando o papel dominante da eficiência técnica, enquanto o FS (0,77) confirma novo caso de retrocesso tecnológico.

O desempenho intermediário é representado por terminais como Oleoplan (MI = 1,51), Yara Brasil Fertilizantes (1,41) e CAIS Navegantes – Entre Gates (1,36), que exibem crescimento acumulado entre cerca de 36% e 51%, sustentado por diferentes combinações entre melhoria operacional e mudança tecnológica. Outros terminais, como Terminal Trombetas (MI = 1,25), Porto Gregório Curvo (1,17) e Terminal Marítimo Gerdau (1,11), apresentam avanços mais modestos, refletindo trajetórias de melhoria gradual.

Em contraste, os terminais situados na extremidade inferior do ranking apresentam declínios expressivos de produtividade. O pior desempenho é observado no terminal TMULT, cujo MI cumulativo é 0,26, indicando perda de 74,08% da produtividade inicial. Outros terminais com desempenho crítico incluem Terminal T03 – STM 04 (MI = 0,42), Macapá (0,42), TERFRON (0,48) e Terminal Portuário Bunge Alimentos (0,62), todos com reduções acumuladas superiores a 35%.

A análise dos componentes cumulativos evidencia padrões sistemáticos. Os terminais mais produtivos tendem a apresentar valores de CU superiores a 2,0, indicando que a melhora operacional, e não a inovação tecnológica, é o principal motor do crescimento sustentado da produtividade no setor. Em contrapartida, terminais de baixo desempenho apresentam CU inferior a 1,00, evidenciando ineficiências persistentes ao longo do período. Embora alguns deles exibam FS cumulativo superior a 1, sugerindo avanços tecnológicos relativos, tais melhorias não se mostraram suficientes para compensar as perdas de eficiência técnica, resultando em queda da produtividade total dos fatores ao longo da década analisada.

4.4. Síntese dos Resultados

Os resultados indicam que, embora a média amostral do MI seja ligeiramente superior a 1 na amostra original, a análise *bootstrap* revela que a produtividade agregada permaneceu estável ao longo do período, com variações modestas e sem tendência clara de crescimento. Quando ocorrem variações, estas estão associadas principalmente a mudanças de

eficiência técnica, e não a deslocamentos tecnológicos. A análise temporal revela marcada volatilidade, com fases de expansão entre 2015–2016 e 2023–2024, intercaladas por períodos de retração, especialmente entre 2020–2023. O ranking cumulativo evidencia diferenças estruturais acentuadas entre os terminais: enquanto alguns cresceram mais de 200%, outros perderam mais de 50% da produtividade no mesmo intervalo. Em conjunto, os resultados sugerem um setor cuja evolução recente depende mais da melhoria de processos, da gestão operacional e da utilização eficiente de recursos existentes do que de transformações tecnológicas profundas.

5. Conclusões

Os resultados indicam que a produtividade dos terminais brasileiros de graneis sólidos manteve-se essencialmente estável entre 2015 e 2024. Apesar de alguns terminais apresentarem ganhos expressivos, o índice de Malmquist permaneceu estatisticamente próximo da unidade, sugerindo ausência de uma trajetória clara de crescimento no setor. A decomposição do índice mostra que as variações observadas decorrem sobretudo de mudanças na eficiência técnica, enquanto a fronteira tecnológica se manteve praticamente constante.

A análise também revelou forte heterogeneidade entre terminais, reforçando a necessidade de políticas operacionais específicas e voltadas à melhoria de processos internos. Ainda que metodologicamente robusto, o estudo enfrenta limitações relacionadas à qualidade e completude da base de dados da ANTAQ e à disponibilidade restrita de *inputs* e *outputs* padronizados, o que pode limitar a captação de diferenças estruturais mais profundas.

Mesmo assim, os achados oferecem implicações práticas relevantes: ao evidenciar que os ganhos de produtividade resultam principalmente de aprimoramentos operacionais, e não de avanço tecnológico, o trabalho aponta oportunidades para intervenções gerenciais e para políticas públicas que estimulem maior padronização de informações, transparência e investimentos voltados à modernização tecnológica do setor.

Referências

- Barros, C. P., Felício, J. A., e Fernandes, R. L. (2012). Productivity analysis of Brazilian seaports. *Maritime Policy & Management*, 39(5):503–523.
- Bogetoft, P. e Otto, L. (2011). *Benchmarking with DEA, SFA, and R*, volume 157 of *International Series in Operations Research & Management Science*. Springer, New York.
- Cabral, A. M. R. e Ramos, F. S. (2018). Efficiency container ports in Brazil: a DEA and FDH approach. *The Central European Review of Economics and Management (CEREM)*, 2(1):43–64.
- Confederação Nacional da Indústria (2022). *Economia brasileira 2022–2023: edição especial do informe conjuntural*.
- da Costa, D. S., Carvalho, M. V. G. S. d. A., de Figueiredo, N. M., de Moraes, H. B., e Ferreira, R. C. B. (2021). The efficiency of container terminals in the northern region of Brazil. *Utilities Policy*, 72:101258.
- da Silva, F. G. F., Martins, F. G. D., Rocha, C. H., e Araújo, C. E. F. (2011). Análise exploratória da eficiência produtiva dos portos brasileiros. *Transportes*, 19(1):5–12.
- Färe, R., Grosskopf, S., Norris, M., e Zhang, Z. (1994). Productivity growth, technical progress, and efficiency change in industrialized countries. *American Economic Review*, 84(1):66–83.
- Kirchner, L. H. C. e Lucas, V. M. (2018). Terminais de contêineres no Brasil: eficiência intertemporal. *Economia Aplicada*, 22(1):63–86.
- Périco, A. E. e da Silva, G. R. (2020). Port performance in Brazil: A case study using data envelopment analysis. *Case Studies on Transport Policy*, 8(2):336–348.
- Quintano, C., Mazzocchi, P., e Rocca, A. (2020). A competitive analysis of EU ports by fixing spatial and economic dimensions. *Journal of Shipping and Trade*, 5(18).
- Wang, C.-N., Nguyen, P.-H., Nguyen, T.-L., Nguyen, T.-G., Nguyen, D.-T., Tran, T.-H., Le, H.-C., e Phung, H.-T. (2022). A two-stage DEA approach to measure operational efficiency in Vietnam's port industry. *Mathematics*, 10(9):1385.