LVI SBPO SIMPÓSIO BRASILEIRO DE PESQUISA OPERACIONAL
DE 04 ATÉ 07 NOVEMBRO 2024
FORTALEZA | CEARÁ

ANÁLISE DE CUSTO E IMPACTO AMBIENTAL NA TOMADA DE DECISÃO DO PROCESSO DE IMPORTAÇÃO DE CARGA EM CONTÊINER

Thiago de Almeida Rodrigues
Universidade Federal do Espírito Santo (UFES)
Av. Fernando Ferrari, 514 - Goiabeiras, Vitória - ES, 29075-910
thiago.a.rodrigues@ufes.br

Rodrigo Revoredo de Almeida
Universidade Federal de Pernambuco (UFPE)
Av. da Arquitetura - Cidade Universitária, Recife - PE, 50740-550
rodrigo.revoredoalmeida@ufpe.br

Moisés Rocha Martins de Medeiros
Universidade Federal de Pernambuco (UFPE)
Av. da Arquitetura - Cidade Universitária, Recife - PE, 50740-550
moises.rocha@ufpe.br

Caroline Maria de Miranda Mota
Universidade Federal de Pernambuco (UFPE)
Av. da Arquitetura - Cidade Universitária, Recife - PE, 50740-550
Caroline.mota@ufpe.br

RESUMO

Os portos secos, estruturas logísticas que estão conectados aos portos marítimos por transporte ferroviário, rodoviário ou hidroviário, desempenham um papel importante para a capilaridade dos serviços de importação e exportação de carga em contêiner, oferecendo além de benefícios operacionais a redução das emissões de CO2 pelo uso do transporte multimodal. Neste contexto, o estudo se concentra no *trade-off* ou nível de compromisso entre o impacto ambiental e os custos do processo de importação e exportação na etapa porto-interior. Com isto em mente, estruturou-se uma matriz de decisão para apoiar a escolha da estratégia logística em um estudo de caso no Estado de São Paulo. Os resultados podem ser utilizados para escolher a estratégia logística que balanceia o custo, fortalece as estratégias ESG (*Environmental*, *Social and Governance*), bem como para formulação de políticas públicas alinhadas aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS).

PALAVRAS CHAVE. Matriz de Decisão, Custo, Emissão de CO2.

ABSTRACT

Dry ports, logistical structures connected to seaports by rail, road, or waterways, play an important role in enhancing the reach of import and export services for container cargo. They offer operational benefits as well as CO2 emissions reduction through the use of multimodal transport. In this context, the study focuses on the trade-off or level of commitment between the environmental impact and the costs of the import and export process in the seaport-hinterland. With this in mind, a decision matrix was structured to support the choice of logistics strategy in a case study in the state of São Paulo. The results can be used to select the logistics strategy that balance cost, strengthen ESG (Environmental, Social, and Governance) strategies, and formulate public policies aligned with the Sustainable Development Goals (SDGs).

KEYWORDS. Decision Matrix. Cost, CO2 Emission.

1. Introdução

O transporte internacional de carga em container apresentou aumentos significativos nos últimos anos [UNCTAD 2022], tornando o transporte marítimo a espinha dorsal das cadeias de suprimentos globais. Para sustentar essa estrutura, um acesso eficiente ao porto marítimo a partir do interior do país torna-se fator fundamental para o desempenho de toda a cadeia de transporte intermodal. Integrando essa cadeia encontram-se os portos secos, que são instalações logísticas de interior que realizam funções semelhantes às de um porto marítimo, exceto pela movimentação de cargas em navios. Conectado diretamente a portos marítimos por transporte ferroviário, rodoviário ou hidroviário, os portos secos oferecem serviços de armazenagem, consolidação e desconsolidação de carga, transbordo, liberação alfandegária, bem como outros serviços adicionais [Roso 2007], [Rodrigues et al. 2023a].

Além de oferecer benefícios em termos de custos operacionais e eficiência, a implementação do conceito de porto seco pode produzir efeitos positivos também do ponto de vista ambiental, promovendo a mudança modal do transporte rodoviário para o ferroviário [Carboni e Orsini 2020]. Neste contexto, a redução das emissões de CO2, por meio da mudança modal do transporte de carga em contêiner é fundamental tanto para as empresas, que possuem um compromisso com um conjunto de práticas empresariais que visam à responsabilidade Ambiental, Social e de Governança corporativa (ESG) quanto para os governos que estão alinhados à agenda 2030 com os 17 ODSs da Organização das Nações Unidas (ONU).

Contudo, o processo de importação e exportação de carga em contêiner envolve diferentes variáveis e tomadores de decisão, que por sua vez possuem interesses conflitantes ao longo da cadeia logística. O processo é dividido em três principais etapas: i) rede porto-interior, ii) operações no porto marítimo, e iii) transporte marítimo [Rodrigues et al. 2020]. Este estudo concentra-se na etapa ‘i’ do processo de transporte internacional de carga, em especial por considerar a operação pelo porto seco como uma opção logística.

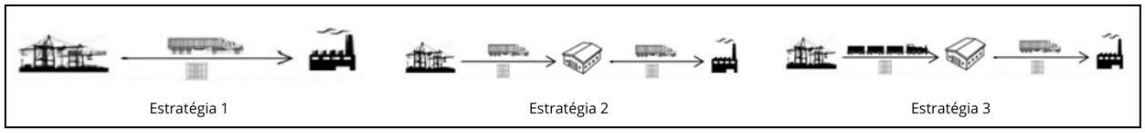
Durante o processo de exportação e importação, diversos custos são considerados na etapa de operação porto-interior. Entre eles, destacam-se o custo de movimentação, custo de armazenagem e o custo de liberação aduaneira. Outros custos são relacionados ao transporte ao longo da rede porto-interior, podendo este ser realizado por meio rodoviário ou multimodal, considerando o transporte da carga entre o porto marítimo e o porto seco por ferrovia. Estes e outros custos foram considerados nos estudos de [Rodrigues et al. 2023a,b], onde os autores realizaram simulações de eventos discretos para apoiar a escolha da estratégia de importação que resultasse no menor custo logístico. Porém, o impacto ambiental com a emissão de CO2 durante o transporte entre os operadores logísticos e os clientes não foram considerados no modelo.

O impacto ambiental pela emissão de CO2 no transporte logístico pode ser analisado por meio de um *trade-off* com o custo para cada estratégia de importação e exportação. Deste modo, o tomador de decisão poderá definir o compromisso entre os custos associados ao processo de internacionalização de carga e as estratégias de redução de emissão de CO2, que podem estar associadas aos objetivos ESG da empresa ou às políticas governamentais alinhadas aos ODS. Deste modo, este estudo tem como objetivo estruturar uma matriz de decisão entre os custos do processo de importação da rede porto-interior e o nível de emissão de CO2 para apoiar o *trade-off* da tomada de decisão da estratégia logística em um estudo de caso no Estado de São Paulo.

2. Configuração da Matriz de Decisão

A matriz de decisão entre custo e impacto ambiental considerou três estratégias de operação e transporte do contêiner na rede porto-interior [Rodrigues et al., 2023a,b]: estratégia 1) operação no porto marítimo e transporte rodoviário direto ao cliente; estratégia 2) transporte rodoviário entre o porto marítimo e o porto seco e operação no porto seco, seguido pelo transporte rodoviário para entrega ao cliente; e estratégia 3) transporte ferroviário entre o porto marítimo e o porto seco e operação no porto seco, seguido pelo transporte rodoviário para entrega ao cliente, como demonstra a Figura 1.

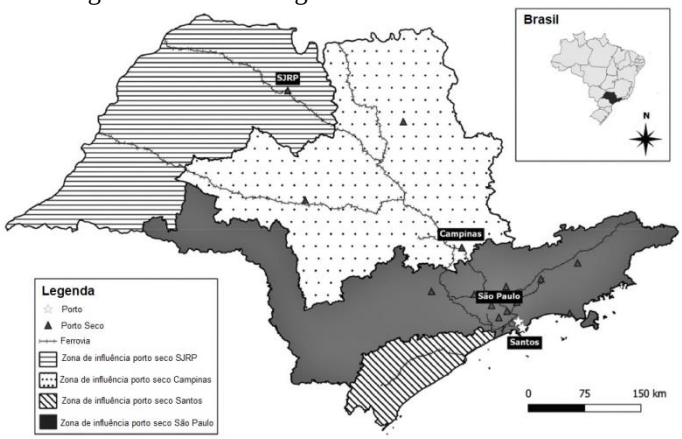
Figura 1: Estratégias de operação e transporte



Fonte: baseado em [Rodrigues et al., 2020]

Neste estudo utilizou-se como referência a estrutura logística do estado de São Paulo, tendo Santos como porto marítimo de referência e três cidades que possuem portos secos, estrutura ferroviária e com diferentes distâncias do porto marítimo, sendo elas: São Paulo, Campinas e São José do Rio Preto, como apresentado na Figura 2.

Figura 2: Estrutura logística do estado de São Paulo



Fonte: baseado em [Rodrigues et al., 2023b]

Neste contexto, foram construídas matrizes de decisão para quatro diferentes cenários de tempo de armazenagem e valor da carga, sendo eles: cenário 1) com tempo de armazenagem de dois dias e valor de carga de R$45.000,00; cenário 2) com tempo de armazenagem de dez dias e valor de carga de R$45.000,00; cenário 3) com tempo de armazenagem de dois dias e valor de carga de R$400.000,00; e cenário 4) com tempo de armazenagem de dez dias e valor de carga de R$400.000,00.

Os cálculos de custo para cada estratégia (equação 1) agregam os custos de movimentação (equação 1), custo de armazenagem (equação 2), custo aduaneiro (equação 3) e o custo de transporte (equação 4), considerando o transporte entre os operadores logísticos e o cliente, localizado na mesma cidade do Porto Seco. Por fim, a emissão de CO2 é calculada pela equação 6. As variáveis e parâmetros utilizadas neste modelo estão descritas na Tabela 1 e as fórmulas, baseadas em [Rodrigues et al., 2023a,b] seguem abaixo.

1. $CTO_{est} = \sum_{est} CMO_{est} + CAZ_{est} + CAD_{est} + CTR_{est}$ (equação 1)
2. $CMO_{est} = \sum_{\substack{i \epsilon pm \\ j \epsilon ps}} tm_{i,j} \times qm_{i,j}$ (equação 2)
3. $CAZ_{est} = \sum_{\substack{i \epsilon pm \\ j \epsilon ps}} taz_{i,j} \times vc_{cen} \times tpe_{i,j}$ (equação 3)
4. $CAD_{est} = \sum_{\substack{i \epsilon pm \\ j \epsilon ps}} tif_{i,j} + tis_{i,j} + tda_{est}$ (equação 4)
5. $CTR_{est} = \sum_{\substack{i \epsilon PM \\ j \epsilon PS \\ r,f \epsilon MT}} (dis_{i,j} \times ttd_{r,f}) + tft_{r,f} + tta_{est}$ (equação 5)
6. $ECO_{est} = \sum_{\substack{i \epsilon PM \\ j \epsilon PS \\ r,f \epsilon MT}} dis_{i,j} \times pes_{r,f} \times tem_{r,f}$ (equação 6)

Tabela 1: Variáveis e parâmetros do modelo

Índices	**Descrição**	**Valor de Referência**
PM	Conjunto de portos marítimos 'i'	Porto de Santos
PS	Conjunto de portos secos 'j'	Portos Secos em São Paulo, Campinas e São José do Rio Preto (SJRP)
MT	Conjunto de modais de transporte rodoviário 'r' e ferroviário 'f'	-
CTO_{est}	Custo total por estratégia	-
CMO_{est}	Custo de movimentação por estratégia	-
CAZ_{est}	Custo de armazenagem por estratégia	-
CAD_{est}	Custo aduaneiro por estratégia	-
CTR_{est}	Custo de transporte por estratégia	-
ECO_{est}		
$tm_{i,j}$	Taxa de movimentação no porto 'i' e no porto seco 'j'	$tm_i = R\$582{,}00$; $tm_j = R\$286{,}00$
$qm_{i,j}$	Quantidade de movimentações no porto 'i' e no porto seco 'j'	Estratégia 1: $qm_i = 1$; Estratégia 2: $qm_i = 1$; $qm_j = 2$; Estratégia 3: $qm_i = 1$; $qm_j = 2$;
$taz_{i,j}$	Taxa de armazenamento no porto 'i' e no porto seco 'j'	$taz_i = 0{,}255\%$; $taz_j = 0{,}114\%$
vc_{cen}	Valor da carga por cenário	$vc_{1,2} = R\$45.000{,}00$; $vc_{3,4} = R\$400.000{,}00$
$tpe_{i,j}$	Tempo de permanência do contêiner no porto 'i' e no porto seco 'j'	Cenários 1,3: 2 dias Cenários 2,4: 10 dias
$dis_{i,j}$	Distância entre o porto 'i' e o porto seco 'j'	*Rodoviário*: Santos – São Paulo: 86 km Santos – Campinas: 181 km Santos – SJRP: 523 km *Ferroviário*: Santos – São Paulo: 65 km Santos – Campinas: 155 km Santos – SJRP: 550 km
$ttd_{r,f}$	Taxa de transporte rodoviário 'r' e ferroviário 'f' por distância	$ttd_r = R\$4{,}114/km$; $ttd_f = R\$3{,}591/km$
$tft_{r,f}$	Taxa fixa por transporte rodoviário 'r' e ferroviário 'f'	$tft_r = R\$785{,}51$; $tft_f = R\$609{,}24$
tta_{est}	Taxa fixa por transporte aduaneiro	$tta_{est} = R\$924{,}57$
$tif_{i,j}$	Taxa de inspeção física no porto 'i' e o porto seco 'j'	$tif_i = R\$528{,}67$; $tif_j = R\$199{,}14$
$tis_{i,j}$	Taxa de inspeção por scanner no porto 'i' e o porto seco 'j'	$tis_i = R\$462{,}67$; $tis_j = R\$333{,}00$
tda_{est}	Taxa de documentação aduaneira para estratégias 2 e 3	$tda_{est} = R\$1500{,}00$
$tem_{r,f}$	Taxa de emissão de CO2 por modal rodoviário 'r' e ferroviário 'f'	$tem_r = 0{,}044$ kgCO_2/ton. km;
$pes_{r,f}$	Peso do conjunto da carga por modal rodoviário 'r' e ferroviário 'f'	$pes_r = 30\ ton$; $pes_f = 47{,}76\ ton$

Fonte: baseado em [Rodrigues et al., 2023a,b]

3. Análise dos Resultados

Os resultados da matriz de decisão oferecem informações relevantes para os tomadores de decisão realizarem o *trade-off* entre os custos da rede porto-interior e o impacto ambiental. A Tabela 2 sintetiza a diferença entre o custo da Estratégia 3 (utilizando porto seco e transporte multimodal) com a Estratégia 1 (utilizando o porto marítimo com transporte rodoviário), bem como a redução da emissão de CO2 ao utilizar o transporte multimodal da Estratégia 3. Observa-se que para os Cenários 1, 2 e 3, reduzir a emissão de CO2, utilizando o transporte multimodal, resulta em um custo adicional à estratégia logística para todas as cidades analisadas. Com esta informação, os tomadores de decisão podem definir o nível de compromisso, ou seja, quanto estão dispostos a gastar pela redução da emissão no transporte das suas cargas, bem como o investimento necessário para a empresa estar alinhada aos objetivos ESG.

Tabela 2: *Trade-off* entre o custo e a emissão de CO2

Cidade	Diferença de Custo (Cenário 1)	Diferença de Custo (Cenário 2)	Diferença de Custo (Cenário 3)	Diferença de Custo (Cenário 4)	Redução de Emissão (kg de CO2)
São Paulo	R$ 2.940,46	R$ 2.432,86	R$ 1.939,36	-R$ 2.572,64	79,52
Campinas	R$ 2.749,82	R$ 2.242,22	R$ 1.748,72	-R$ 2.763,28	176,12
São José do Rio Preto	R$ 2.325,28	R$ 1.817,68	R$ 1.324,18	-R$ 3.187,82	501,16

Por outro lado, para o Cenário 4 onde a carga possui um alto valor agregado e fica armazenada por mais tempo, a operação pelo porto seco utilizando o transporte multimodal, além do menor custo, resulta em uma redução da emissão de CO2. Além disso, observa-se que quanto maior a distância percorrida pelo transporte ferroviário, maior a redução da emissão de CO2, como indica o resultado da cidade de São José do Rio Preto. Este resultado também pode ser

utilizado para a definição de políticas públicas atreladas aos objetivos da ODS. Um exemplo de incentivo governamental utilizado em países da União Europeia para tal redução é a utilização de crédito de carbono, que custa aproximadamente US$50,00/ton de CO2, onde o valor pode ser descontado dos impostos pagos pela empresa que investem na redução das suas emissões [EDF 2017].

4. Considerações Finais

Este estudo apresentou uma matriz de decisão entre os custos da rede porto-interior e a emissão de CO2 para cada estratégia logística utilizando um estudo de caso do Estado de São Paulo. Os resultados obtidos podem ser úteis tanto para empresas que queiram fortalecer suas estratégias ESG quando para formulação de políticas públicas. Este resultado é a primeira etapa para a construção de um modelo mais robusto de decisão multicritério, podendo considerar outros fatores de *trade-off* como a confiabilidade da rede, o tempo de entrega, o congestionamento de vias e o nível de serviço oferecido.

Referências

Carboni, A., e Orsini, F. (2020). Dry ports and related environmental benefits: a case study in Italy. *Case Studies on Transport Policy*, 8:416-428.

EDF. (2017). The true cost of carbon pollution. `https://www.edf.org/true-cost-carbon-pollution`. Acessado: 2024-06-05.

Rodrigues, T., Mota, C., Pinto, D., e Araújo, A. (2020). Identifying the factors engaged in customers' choice to operate through dry port or seaport. In *Anais do XXVI IJCIEOM*, p. 1-8, Rio de Janeiro. ABEPRO-ADINGOR-IISE-AIMASEM.

Rodrigues, T., Mota, C., Ojiako, U., Chipulu, M., Marshall, A., e Dweiri, F. (2023a). A flexible cost model for seaport-hinterland decisions in container shipping. *Research in Transportation Business and Management*, 49:1-18.

Rodrigues, T., Mota, C., Ojiako, U., Chipulu, M., Marshall, A., e Dweiri, F. (2023b). Competitiveness throughout the seaport-hinterland: a container shipping analysis. *Maritime Policy & Management*, In press.

Roso, V. (2007). Evaluation of the dry port concept from an environmental perspective: A note. *Transportation Research Part D*, 12: 523-527.

UNCTAD. (2022). Review of Maritime Transport 2022. `https://unctad.org/system/files/official-document/rmt2022_en.pdf`. Acessado: 2024-02-01.