

Avaliação do potencial de uso da hidrovia do Rio Paraguai utilizando análise envoltória de dados

Evaluation of the potential use of the Paraguay River waterway using data envelopment analysis

Catharina Ruiz¹, Orivalde Soares da Silva Júnior², Jose Carlos César Amorim², Renata Albergaria de Mello
Bandeira²

RESUMO: O presente artigo tem como objetivo analisar o potencial de uso da hidrovia do rio Paraguai diante da análise envoltória de dados - DEA para verificar a eficiência das alternativas possíveis de rotas de transporte de carga de soja do Estado de Mato Grosso para exportação em comparação às já existentes. Adotou-se o método BCC orientado a *input*, representado pelo custo de acidente e emissões de CO₂e, e *output*, representado pela economia tanto de tempo e custo de transporte. Para a análise, a área de estudo foi dividida em quatro cidades centroides, em torno da área de influência do rio em análise, para os quais o modelo foi aplicado. Os resultados mostram que a hidrovia tem potencial de uso em todos os polos, exceto no centroide de Rondonópolis, cuja menor distância entre as ferrovias lhe proporciona um melhor desempenho.

Palavras-chave: Custo de acidente. DEA. Eficiência. Emissões de CO₂e.

ABSTRACT: This article aims to analyze the potential use of the Paraguay River waterway using data envelopment analysis - DEA to verify the efficiency of possible alternative routes for transporting soybean cargo from the state of Mato Grosso for export compared to existing ones. The input-oriented BCC method was adopted, represented by the accident cost and CO₂e emissions, and output, represented by the savings in both time and transportation cost. For the analysis, the study area was divided into four centroid cities, around the area of influence of the river under analysis, to which the model was applied. The results show that the waterway has potential for use in all poles, except in the Rondonópolis centroid, whose shorter distance between railroads gives it a better performance.

Keywords: Accident cost. CO₂e Emissions. DEA. Efficiency.

Autor correspondente:

Catharina Ruiz: catharina.ruiz93@gmail.com

Recebido em: 11/09/2019

Aceito em: 24/09/2020

INTRODUÇÃO

O Brasil é um dos países com maior crescimento no mercado internacional do agronegócio, sendo o segundo maior produtor mundial de soja. Contudo, a logística é um entrave para a competitividade do país no mercado mundial, sendo a mesma precária e dispendiosa, resultando em elevados custos de produção e transporte (EMBRAPA, 2018). Essa deficiência logística se deve a uma multiplicidade de fatores, como a baixa eficiência e capacidade reduzida das ferrovias e o excesso de burocracia e infraestrutura dos portos brasileiros. Por consequente, extensas filas de caminhões são frequentes nos principais portos de exportação, implicando em um tempo de espera demasiado para transbordo de carga, o que muitas vezes leva ao não cumprimento dos prazos de entrega para os compradores internacionais. Desse modo, torna-se inevitável uma redução da competitividade da soja no mercado mundial.

O Estado de Mato Grosso é o maior produtor brasileiro de soja, sendo cerca de 50% da produção total dessa *commodity* exportada pelo Porto de Santos (IMEA, 2018). Porém, o transporte da soja do Estado de Mato Grosso à região Sudeste é realizado, em sua maioria, por modo rodoviário, o que implica em aumento de congestionamento e riscos de acidentes. Neste cenário, o investimento em hidrovias surge como uma importante alternativa para

¹ Discente do Programa de Pós-graduação em Engenharia de Transportes do Instituto Militar de Engenharia (IME), Rio de Janeiro (RJ), Brasil.

² Docentes permanentes do Programa de Pós-graduação em Engenharia de Transportes do Instituto Militar de Engenharia (IME), Rio de Janeiro (RJ), Brasil.

escoamento da soja, a qual tem atraído a atenção dos setores público e privado. No relatório executivo do Plano Nacional de Logística (MINISTÉRIO DOS TRANSPORTES, 2018), foi prevista a implantação de hidrovias na região Oeste do Estado de Mato Grosso. Dentre elas, destaca-se a implantação de um porto na hidrovia do Rio Paraguai, capaz de oportunizar rotas direcionadas a portos marítimos de exportação da região da Bacia do Rio da Prata. Essa nova rota capacitará uma melhor distribuição das cargas para exportação entre os portos do país. Logo, evidencia-se a importância da realização de estudos com intuito de verificar a eficiência e a viabilidade das novas operações.

No Brasil, o transporte de carga ocorre majoritariamente pelo modo rodoviário. Mais de 61% da carga transportada no país é pelo modo rodoviário, 22% pelo ferroviário, 2% hidroviário, e os outros 4% pelos demais modos de transporte (ILOS, 2019). A falta de investimento em infraestrutura no setor de transportes, com o decorrer dos anos, gerou problemas para todos os modos, gerando ineficiência logística, custos adicionais e aumento de acidentes. Em hidrovias, principalmente, houve a restrição de calado, que é de suma importância para o transporte de carga, deficiências de sinalização e balizamento ocasionando acidentes e restrições quanto à navegação devido à inexistência de eclusas e obras para canalização de hidrovia (GUIMARÃES *et al.*, 2015).

Contudo, o Plano Hidroviário Estratégico (PHE) desenvolveu um portfólio de investimento que prevê cerca de 20 milhões de reais para melhorar a eficiência do modo hidroviário no período de 2014 a 2031, que, quando executado, contribuirá para uma matriz de transporte mais equilibrada. Ainda, o PHE tem o objetivo de melhorar o escoamento da produção agrícola e demais produtos, expandindo a rede hidroviária brasileira em mais de três mil quilômetros, além de otimizar o seu potencial comercial (MINISTÉRIO DOS TRANSPORTES, 2013).

Dessa maneira, os investimentos previstos podem possibilitar um redirecionamento para rotas que empreguem o modo hidroviário, que é importante tanto em termos socioeconômicos como ambientais. O transporte hidroviário permite a realização do transporte de grandes quantidades de carga com uma melhor relação custo-benefício, contribuindo para a redução do preço de frete em relação ao modo rodoviário, representando uma redução em até 70% do valor total. Além disso, o transporte hidroviário requer gastos com combustíveis até vinte vezes inferiores ao necessário para transportar uma quantidade de carga equivalente pelo modo rodoviário (SANTOS *et al.*, 2012). O modo hidroviário também é o mais seguro, visto que a ocorrência de acidentes é quase nula e a segurança de transporte é total (ANTAQ, 2008). O uso de hidrovias ainda contribui para reduzir as emissões de CO₂ em, aproximadamente, 90% quando comparado ao uso rodoviário (SANTOS *et al.*, 2012). Entretanto, uma das principais desvantagens do modo hidroviário é que sua velocidade operacional é inferior aos outros modos de transporte (GONÇALVES *et al.*, 2015).

Neste contexto, o objetivo deste artigo é avaliar a eficiência do potencial de uso da hidrovia do Rio Paraguai, a partir da utilização da ferramenta de Análise Envoltória de Dados (DEA - *Data Envelopment Analysis*). A metodologia proposta envolve o estudo comparativo da eficiência das alternativas das rotas aplicadas atualmente no mercado com novas rotas potenciais, incluindo a hidrovia do Rio Paraguai como uma delas. Assim, para a condução da pesquisa, dividiu-se a área de estudo em quatro cidades centroides, concentradoras de grãos de soja, localizadas na região de influência da hidrovia do Rio Paraguai, que envolve a região Oeste do Estado de Mato Grosso (MIRANDA, 2008). Para tal, foram definidas 44 rotas, dentre as quais se considera a possibilidade de serem utilizadas atualmente e aquelas que poderão existir, caso sejam implementadas as propostas do Plano Nacional de Logística de 2018.

2 METODOLOGIA

2.1 ANÁLISE ENVOLTÓRIA DE DADOS - DEA

A Análise Envoltória de Dados (DEA - *Data Envelopment Analysis*), desenvolvida por Charnes *et al.* (1978), é uma aplicação de programação linear para apoio à decisão em problemas de natureza multidisciplinar. Trata-se de

um método não paramétrico cujo objetivo é avaliar a eficiência entre determinadas amostras, denominados DMUs (*Decision Making Units*), que têm características operacionais similares, podendo ser empreendimentos públicos, privados, comerciais ou industriais, escolas, universidades, bancos, conjuntos habitacionais, portos, aeroportos, etc (LINS; MEZA, 2000; SOUZA-JÚNIOR, 2010).

O método possibilita, ainda, analisar de forma separada as DMUs, medindo a eficiência das atividades operacionais em relação ao conjunto de DMUs selecionadas, calculando a distância entre a fronteira eficiente de produção e a DMU em análise. A fronteira eficiente de produção (ou função fronteira de produção) representa a região do gráfico que é dada pela máxima quantidade de *outputs* (produtos) que podem ser obtidos a partir dos *inputs* (insumos) utilizados (ACOSTA *et al.*, 2011; LINS; MEZA, 2000). De um modo geral, os *inputs* devem ser fatores que desejam ser minimizados, enquanto os *outputs* são os fatores que se deseja maximizar (WBCSD, 2000).

Existem dois modelos clássicos de Análise Envoltória de Dados: o CCR ou CRS (CHARNES *et al.*, 1978), que leva em conta os retornos de escala constantes; e o modelo BCC ou VRS (BANKER *et al.*, 1984), que não assume uma proporcionalidade entre *inputs* e *outputs*, possibilitando que as DMUs consumam quantidades significativas de recursos e tenham retornos decrescentes de escala e vice-versa. O modelo pode ser orientado a *inputs*, quando se deseja minimizar os recursos disponíveis sem alterar a quantidade de produtos obtidos, ou a *output* quando se deseja obter o máximo de produtos sem alterar a quantidade de insumos consumidos (BERTOLOTO; MELLO, 2011).

Assim sendo, os modelos DEA apresentam os valores das eficiências de cada DMU, tal como seus respectivos pesos, além de identificar as DMUs referências (ou *benchmarks*) para as consideradas ineficientes, possibilitando que cada DMU ineficiente tenha, pelo menos, uma DMU com a qual possa se comparar, com o objetivo de melhorar o desempenho (SILVEIRA *et al.*, 2012). Para melhor avaliar as DMUs existentes, faz-se necessária a análise da fronteira invertida, que é uma avaliação pessimista das unidades. Essa análise é feita por meio da troca dos *inputs* com os *outputs* do modelo original. Com isso, forma-se uma fronteira com as piores práticas gerenciais (conhecida também por fronteira ineficiente) (MELLO *et al.*, 2003; SILVEIRA *et al.*, 2012).

A análise envoltória de dados (DEA) tem sido aplicada para analisar a eficiência de diferentes sistemas e operações de transporte. Mello *et al.* (2003), por exemplo, adotam o DEA para estudar a eficiência das rotas das companhias aéreas brasileiras, considerando a relação entre insumos (*inputs*) e produtos (*outputs*). O modelo leva em conta os retornos de escala, através da comparação de cada companhia, permitindo o cálculo do índice de eficiência e seus alvos, possibilitando assim às companhias aéreas mudarem suas metas gerenciais, sejam para frota, tempo ou vendas, a fim de aumentar a eficiência de cada companhia aérea no mercado nacional.

Kuosmanen e Kortelainen (2005) estudaram a eficiência do transporte rodoviário nas três maiores cidades do Leste da Finlândia, com a utilização do DEA. Os autores converteram diferentes impactos sobre o meio ambiente em uma única medida. Em seus resultados, uma das cidades se mostrou eficiente no quesito eco eficiência, o que se deve principalmente às tecnologias do sistema de transporte da cidade, se tornando referência para as demais.

Senra *et al.* (2007), por sua vez, analisaram quatro métodos distintos de análise com o auxílio do DEA, para assim analisar a eficiência de operadores logísticos na entrega domiciliar de jornais na região metropolitana do Rio de Janeiro, considerando como *inputs* variáveis como a quantidade de entregadores, janela de tempo e reclamações dos clientes e, como *outputs*, número de jornais entregues e quantidade de pontos de entrega. Para os quatro métodos analisados, houve vantagens e desvantagens, entretanto, concluiu-se a eficiência da utilização do DEA em todos, constatando sua eficácia como ferramenta de gestão.

Gonçalves *et al.* (2015) analisaram a eficiência do potencial uso da hidrovia Tocantins-Araguaia com a utilização do DEA, verificando a eficiência das alternativas de possíveis rotas de transporte de carga para exportação em comparação às já existentes, verificando assim a sua viabilidade para transporte de carga geral em sua área de influência.

Amoroso *et al.* (2015) analisam a eficiência de pequenos aeroportos italianos comparados a um conjunto de heliportos de transporte a fim de mostrar a diferença na produtividade dos dois tipos de infraestrutura. Devido ao difícil acesso em determinadas áreas, a conversão dos pequenos aeroportos em heliportos se mostrariam mais eficientes para que possam fazer a alimentação de terminais concentradores de forma segura e rápida. O trabalho é considerado como o primeiro caso de aplicação da metodologia DEA a um grupo de heliportos.

Djordjevic e Krnac (2019) comparam o modelo DEA ao método TOPSIS (Técnica para Ordem de Preferência por Similaridade Ideal) para a avaliação da eficiência energética e ambiental do transporte em nível macro, ou seja, dos setores rodoviário, ferroviário e aéreo europeus, obtendo como resultado melhor eficiência do setor rodoviário e ineficiência para o setor ferroviário de acordo com os dados disponíveis para estudo.

Saeedi *et al.* (2019) apresentam um método DEA de rede modificada para medir o desempenho de diferentes cadeias de transporte intermodal de carga europeia, a fim de encontrar as fontes de ineficiências da cadeia, considerando as atividades de transbordo de carga e tipos de transportes. Após identificação das ineficiências, as mesmas são discutidas e, conseqüentemente, sugerindo melhorias para as mesmas.

2.2 APLICAÇÃO DO MÉTODO DEA

Para que possamos entender melhor a aplicação do método, se faz necessário entender o conceito de eficiência. Segundo Guabiroba (2013) a medida de eficiência é a relação entre o esforço e resultado, o qual quanto menor for o esforço necessário para produzir um resultado, maior é a eficiência deste. Nesse contexto ainda, o processo eficiente é aquele que alcança maiores resultados com os mesmos ou menores recursos, ou que, ao menos, mantém os resultados com menores recursos utilizados.

Para realizar a análise envoltória de dados deste artigo foi aplicado o modelo BCC utilizando o *software* SIAD, o qual utiliza o algoritmo Simplex para a solução de problemas de programação linear (MEZA *et al.*, 2005), orientado a *output*, o qual utiliza para cada DMU o problema de programação linear representado pelas expressões de (1) a (5).

$$\text{Min } z = h_o \quad (1)$$

Sujeito a:

$$h_o x_{io} \geq \sum_k \lambda_k x_{ik}, \forall_i \quad (2)$$

$$\sum_k \lambda_k y_{jk} \geq y_{jo}, \forall_j \quad (3)$$

$$\sum_k \lambda_k = 1 \quad (4)$$

$$y_k \geq 0, \forall_k \quad (5)$$

Onde h_o é a variável de decisão que representa a eficiência da DMU_o em análise; y_k são as variáveis de decisão que representam a contribuição individual da DMU_k na definição do alvo da DMU_o ; x_{io} e y_{jo} são os *inputs* e *outputs* da DMU_o , respectivamente; λ_k é a contribuição individual da DMU_k .

Sendo assim, é resolvido um modelo de programação linear para cada DMU, fornecendo, além do índice de eficiência, os pesos das variáveis, os *benchmarks* e os alvos para as DMUs ineficientes (esses dois últimos são determinados a partir dos valores das variáveis duais), obtendo assim os resultados completos para o método DEA.

Para o cálculo da ecoeficiência foi adotada a equação de Mello *et al.* (2003) e Silveira *et al.* (2012), obtendo-se a fronteira invertida para que possam ser analisadas as piores práticas gerenciais (conhecidas, também, por fronteiras ineficientes). A Equação (6) descreve que a fronteira invertida é baseada na média aritmética das eficiências otimistas e eficiências pessimistas.

$$\text{Eficiência Final} = \frac{\text{Eficiência otimista} - \text{Eficiência pessimista} + 100}{2} \quad (6)$$

2.3 ÁREA DE ESTUDO

De acordo com Souza *et al.* (2016), o modo hidroviário além de possuir uma grande capacidade de escoamento, possui o custo de transporte por quilômetro até duas vezes menor que o ferroviário e em até cinco vezes inferior à rodovia, entretanto, um dos motivos da sua pequena participação no transporte de produtos agrícolas deve-se ao seu deslocamento lento. Sendo assim, de acordo com os autores, dependendo da rota, época do ano e volume da carga, com a adoção do transporte multimodal é possível alcançar valores econômicos superiores em relação ao transporte unimodal, haja vista que, para a soja, o valor de frete pode ocasionar um aumento de 16,9% no preço final do produto.

Em relação ao produto em análise, Delai *et al.* (2017), através da pesquisa exploratória e descritiva de dados secundários referentes aos preços de frete, armazenagem da produção de soja e preço da saca, analisaram a melhor estratégia para o produtor de soja, a fim de se obter maior vantagem logística com a venda ou armazenagem de grãos. Os autores apontam que existe grande incerteza quanto ao tempo de armazenagem, visto que os custos da mesma e do frete impactam diretamente na receita final do produtor, entretanto, a armazenagem se torna um dos fatores imprescindíveis devido às oscilações de preços da soja.

Este trabalho tem como foco de estudo a hidrovia do Rio Paraguai, a qual é constituída como uma das vias de transporte fluvial de utilização mais antiga no Brasil. Operando em corrente livre, essa hidrovia é considerada artéria vital para o Mercado Comum do Sul (Mercosul), com seus 3.442 km de extensão, desde Cáceres até o estuário do Rio da Prata, em Nova Palmira, Uruguai (MIRANDA, 2008).

Minotti (2018) enfatiza que devido à larga extensão da hidrovia do Rio Paraguai, a mesma abrange diferentes ecossistemas, com biodiversidade ainda desconhecida, principalmente no pantanal mato-grossense. A autora enfatiza, ainda, que os projetos vigentes para a hidrovia são a dragagem e eliminação de afloramentos rochosos na região do Pantanal e dragagem na região do Rio Paraná, para que possa ser realizado o transporte de trens-barcaças e graneleiros em toda a sua extensão hidroviária.

Guerrero *et al.* (2013) analisam o custo de dragagem da hidrovia do Rio Paraguai para que a mesma seja operante em sua capacidade mínima exigida para os transportes de graneleiros durante o ano todo. Seu estudo foi motivado após uma embarcação graneleira encalhar, interrompendo o comércio fluvial por dez dias, o que acarreta danos ao setor do agronegócio, haja vista que a hidrovia em análise transporta aproximadamente 100 milhões de toneladas de carga anualmente, tornando a manutenção da mesma imprescindível para a economia da América do Sul.

Sendo assim, para que o transporte de grãos agrícolas opere em grande escala na hidrovia do Rio Paraguai, é necessário implantar sistemas logísticos eficientes e realizar adaptações de infraestrutura, haja vista a existência de

bancos de areia, curvas com raios na ordem de 150 m. A hidrovía opera na exportação de granéis agrícolas de Cáceres (MT) em direção a Corumbá (MS), Ladário (MS) e Nova Palmira (Uruguai), de onde é importada em escala moderada carga com perfil diversificado (CORREIA *et al.*, 2016; MIRANDA, 2008).

Em contrapartida aos estudos relacionados às mudanças necessárias para o funcionamento da hidrovía do Rio Paraguai, Schulz *et al.* (2017) levantam o questionamento entre o conflito de interesses da Política da Água brasileira e do setor agropecuário na região de Cáceres - Mato Grosso a Corumbá - Mato Grosso do Sul com determinação de valores para fatores de comparação. Os autores enfatizam que os valores dos *stakeholders* apoiadores da hidrovía são os mesmos, como eficiência da adoção do canal fluvial como meio de transporte e desenvolvimento econômico regional e nacional em relação a outros países, enquanto os oponentes da utilização da hidrovía apontam que seus valores são o cultural, justiça social e ambiental, conservação e tradição.

Este trabalho analisa as alternativas de transporte de soja mato-grossense, visto que a mesma é uma *commodity* de grande influência nacional. Dessa forma, os polos de estudo foram classificados como cidades centroides concentradoras do grão (soja) na área de influência da hidrovía do Paraguai com maior número de rotas utilizadas e que englobem todos os portos de destino aplicados no mercado real atual, sendo estas localizadas na Região Oeste e Centro-Sul do Estado de Mato Grosso.

Os municípios analisados foram: Sinop, Sorriso (maior produtor e exportador de soja brasileiro), Rondonópolis e Primavera do Leste, os quais serão denominados por cidades centroides. Essas cidades centroides, destacadas na Figura 1, se encontram a aproximadamente 2.000 km de distância dos portos de destino.

A partir de cada cidade centroe, foram definidas rotas englobando os vários destinos que cada uma delas possui, como ilustrado na Figura 1, resultando em 44 rotas alternativas, com destino aos vários portos utilizados para exportação. Para cada cidade centroe foram consideradas novas alternativas em processo de implantação, incluindo a hidrovía do Rio Paraguai. As rotas foram analisadas de acordo com as variáveis: custo de acidente, emissões de CO₂ e economia de tempo e economia do custo de transporte, sendo as mesmas orientadas a *input*.



Figura 1. Principais rotas para exportação de soja mato-grossense

2.4 ESCOLHA DAS VARIÁVEIS

As variáveis selecionadas como *input* são: a emissão de CO₂e e o custo com acidentes, onde o objetivo é inalterar as mesmas de forma que haja mais eficiência para o meio de transporte. As variáveis selecionadas como *output*, visando à maximização das mesmas, são a maior economia de frete para os operadores e maior economia de tempo, visando uma entrega ágil do produto, como apresenta a Figura 2.

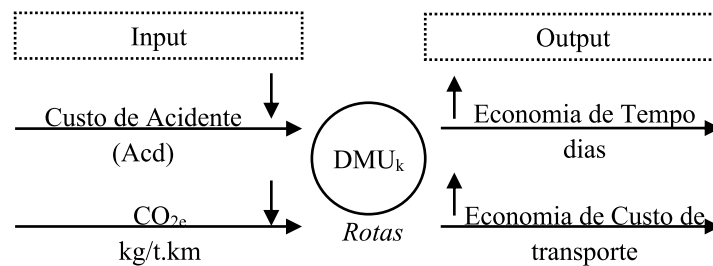


Figura 2. Esquema DEA. Fonte: Adaptado de Gonçalves *et al.* (2015)

Sabe-se que entre as vantagens do transporte intermodal de cargas se enquadra a redução do consumo energético e da poluição, haja vista a utilização de veículos com capacidades demasiadas para o deslocamento da carga, como os comboios hidroviários e ferroviários, os quais transportam com menos gasto de energia. Portanto, com a menor queima de combustível fóssil, haverá menor emissão de poluentes atmosféricos e sonoros por parte dos veículos supracitados, ressaltando, assim, a importância desta primeira variável escolhida. Diante disso, para os valores dos fatores de emissão de CO₂e (kg/t.km), foram considerados os dados de João *et al.* (2016), que é dado em kg de CO₂ por tonelada de soja exportada por quilômetro percorrido (kg/t.km) para cada modo de transporte, sendo eles: 0,11917 para o modo rodoviário; 0,0346 para o ferroviário; e 0,018 para o hidroviário.

Quanto à variável custos de acidentes foi escolhido devido aos custos sociais que impactam diretamente na economia brasileira. Segundo a Confederação Nacional de Transportes (CNT, 2018), para o ano de 2018 foram registrados 69.206 acidentes, com o custo de R\$ 9,73 bilhões. Os valores adotados para o cálculo de custo de acidente total (R\$/t.km) foram: 0,1246 para o modal rodoviário; 0,0311 para o ferroviário; e 0,0077 para o hidroviário (ANTAQ, 2008).

Quanto às variáveis economia de tempo e economia de custo de transporte, sabe-se que os produtos agropecuários de modo geral são perecíveis, necessitando de uma logística de distribuição adequada, evitando, em sua movimentação, estoques excessivos e imobilizados, além de visar a economia com capital imobilizado para o ponto de vista da transportadora, tornando-se necessária a redução do tempo em transporte, quanto à última variável, além da óbvia redução de custos de distribuição, há a vantagem para a redução do preço do produto final, aumentando a competitividade e vendas brasileiras. Para os cálculos de frete (R\$/t.km), foram considerados os valores da base de dados do IMEA (2019), onde, para o modo rodoviário, com distâncias menores que 500 km o valor é de 0,23; entre 501 km e 1000 km o valor é de 0,18; entre 1001 km e 1500 km o valor é de 0,17 km; e acima de 1500 km o valor é de 0,14; para o modo ferroviário o valor é fixo para qualquer distância de 0,10; para o modo hidroviário, para distâncias menores que 500 km, o valor é de 0,057; entre 501 km e 1000 km o valor é de 0,049; entre 1001 km e 1500 km o valor é de 0,046 km; e acima de 1500 km o valor é de 0,036; por fim, para o custo de transbordo o valor é de 28,84 (R\$/t).

Considerando as distâncias de rota, calculou-se o custo por tonelada transportada (R\$/t); é calculada a economia em relação ao custo de transporte para cada cenário, o qual é considerado como zero o valor mais alto, e os demais como a subtração de cada Origem Destino com a rota mais cara. Por fim, para o cálculo da economia de tempo,

o qual possui a mesma concepção de cálculo da economia de frete, foram considerados os valores de velocidade média fornecidos pelo CNT (2011; 2013; 2016) a fim de efetuar o valor final em horas de cada Origem Destino estudado, sendo adotados como velocidades médias (km/h) os valores de: 60 para o modo rodoviário; 31 para o modo ferroviário; 18 para o modo hidroviário.

Com o uso do DEA, objetiva-se avaliar as eficiências das alternativas que utilizam a hidrovia comparando às demais. Inicialmente, serão analisadas as duas variáveis de *input* e as duas de *output*. Contudo, devido à importância de se verificar cada uma delas separadamente, para assim identificar sob qual(is) aspecto(s) a eficiência determinada realmente se dá, outros dois cenários foram definidos, cada um com um *output* separado, resultando assim um total de três rodadas, como apresentado no Quadro 1.

Quadro 1. Rodadas analisadas

Rodada	Input	Output
Rodada 1	Custo de Acidentes	Economia de Frete e Economia de Tempo
Rodada 2	E	Economia de Frete
Rodada 3	CO ₂ e	Economia de Tempo

Fonte: Elaborado pelo autor.

3 RESULTADOS

Após a definição das variáveis e seus valores, foi possível obter os dados a serem aplicados no método DEA, sendo os mesmos apresentados na Tabela 1.

Tabela 1. Valores considerados para o estudo

Alternativas	Destino	Modo	Distância (km)	Emissão de CO ₂ e total (kg/t)	Custo Acidente Total	Economia no Custo de Transporte	Economia de Tempo																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
A1	Rondonópolis (MT)	R	651	129,722	127,982	89,041	5,062																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
	Santos (SP)	F	1507					A2	São Simão (GO)	R	1199	171,636	169,811	15,379	4,556	Pederneiras (SP)	H	640	A3	Santos (SP)	F	498	226,249	230,009	10,831	4,748	Araguari (MG)	R	1524	A4	Vitória (ES)	F	1290	147,813	142,027	94,480	4,190	Miritituba (PA)	R	1070,28	A5*	Vila do Conde (PA)	H	1126	247,050	252,558	47,324	4,958	Marabá (PA)	R	1995	A6	Belém (PA)	H	517	177,931	176,609	55,715	4,629	Santarém (PA)	R	1365	A7	Barcarena (PA)	H	848	273,376	285,832	29,786	5,947	S. F. do Sul (SC)	R	2294	A8	Imbituba (SC)	R	2503	298,283	311,874	0,000	5,802	Santos (SP)	R	1998	A9	Paranaguá (PR)	R	2219	264,438	276,487	40,475	5,999	Cáceres (MT)	R	674	A10	Nueva Palmira (URU)	H	3055	135,311	107,504	123,982	0,000	Rondonópolis (MT)	R	160	B1	Santos (SP)	F	1507	71,209	66,804	162,568	5,299	São Simão (GO)	R	718	B2	Pederneiras (SP)	H	640	114,315	109,879	82,461	4,786	Santos (SP)	F	498	B3	Colinas (TO)	R	1496	211,944	216,662	0,000	5,089	Itaqui (MA)	F	973	B4*	Alvorada (TO)	R	897	160,664	160,096	33,571	4,724	Itaqui (MA)	F	1554	B5	Araguari (MG)	R	1034	167,856	168,955	46,572	4,983	Vitória (ES)	F	1290	B6*	Marabá (PA)	R	1863,42	231,370	236,163	59,633	4,944	Belém (PA)	H	517	B7	Miritituba (PA)	R	1637,42	215,399	212,693	35,829	3,692	Vila do Conde (PA)	H	1126	B8	S. F. do Sul (SC)	R	1826	217,604	227,520	90,040	6,167	Santos (SP)	R	1516	B9	Paranaguá (PR)	R	1750,41	208,596	218,101	100,813	6,220	Cáceres (MT)	R	523,45	B10	Nueva Palmira (URU)	H	3055	117,370	88,745	144,674	0,000	Rondonópolis (MT)	R	734,2	C1	Santos (SP)	F	1507	139,637	138,349	75,295	5,036	São Simão (GO)	R	1281	C2	Pederneiras (SP)	H	640	181,408	168,375	2,749	4,531	Santos (SP)	F	498	C3	Miritituba (PA)	R	1054,38	145,702	139,954	98,977	4,261	Vila do Conde (PA)	H	1114	C4*	Marabá (PA)	R	2079	257,060	263,024	36,601	4,931	Belém (PA)	H	517	C5	Santarém (PA)	R	1281,19	167,943	166,166	99,989	4,719	Barcarena (PA)	H	848	C6	Colinas (TO)	R	1711	237,566	243,451	17,054	5,076	Itaqui (MA)	F	973	C7*	Alvorada (TO)	R	1199	196,653	197,725	0,000	4,650	Itaqui (MA)	F	1554	C8	Imbituba (SC)	R	2586	308,174	322,216	18,260	5,776	Paranaguá (PR)	R	2302,18	C9	Santos (SP)	R	2090	249,065	260,414	60,108	6,120	Cáceres (MT)	R	719,84	C10	Nueva Palmira (URU)	H	3055	140,773	113,216	116,969	0,000	Santos (SP)	F	1507	D1	Alto Araguaia (MT)	R	211,2	70,529	67,088	122,878	5,527	Santos (SP)	F	1311	D2	Itiquira (MT)	R	137,23	65,520	61,292	129,180	5,430	Santos (SP)	F	1421	D3	São Simão (GO)	R	588	98,823	93,681	58,607	4,876	Pederneiras (SP)	H	640	D4	Santos (SP)	F	498	152,483	152,882	11,180	5,073	Araguari (MG)	R	905	D5	Vitória (ES)	F	1290	217,398	214,915	15,293	3,707	Porto Velho (RO)	R	1656	D6	Itacoatiara (AM)	H	1114	202,231	211,446	61,139	6,257	S. F. do Sul (SC)	R	1697	D7	Santos (SP)	R	1388	165,408	172,945	68,062	6,471	Paranaguá (PR)	R	1622	D8	Rio Grande (RS)	R	2126	253,355	264,900	0,000	5,959	Cáceres (MT)	R	502	D9	Nueva Palmira (URU)	H	3055	114,813	86,073	101,255	0,000	Santos (SP)	F	1507	D10	Alto Araguaia (MT)	R	211,2	70,529	67,088	122,878	5,527	Santos (SP)	F	1311	D11*	Itiquira (MT)	R	137,23	65,520	61,292	129,180	5,430	Santos (SP)	F	1421	D12	São Simão (GO)	R	588	98,823	93,681	58,607	4,876	Pederneiras (SP)	H	640	D13	Santos (SP)	F	498	152,483	152,882	11,180	5,073	Araguari (MG)	R	905	D14	Vitória (ES)	F	1290	217,398	214,915	15,293	3,707	Porto Velho (RO)	R	1656	D15	Itacoatiara (AM)	H	1114	202,231	211,446	61,139	6,257	S. F. do Sul (SC)	R	1697	D16	Santos (SP)	R	1388	165,408	172,945	68,062	6,471	Paranaguá (PR)	R	1622	D17	Rio Grande (RS)	R	2126	253,355	264,900	0,000	5,959	Cáceres (MT)	R	502	D18	Nueva Palmira (URU)	H	3055	114,813	86,073
A2	São Simão (GO)	R	1199	171,636	169,811	15,379	4,556																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
	Pederneiras (SP)	H	640																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																				
A3	Santos (SP)	F	498	226,249	230,009	10,831	4,748																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
	Araguari (MG)	R	1524																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																				
A4	Vitória (ES)	F	1290	147,813	142,027	94,480	4,190																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
	Miritituba (PA)	R	1070,28																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																				
A5*	Vila do Conde (PA)	H	1126	247,050	252,558	47,324	4,958																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
	Marabá (PA)	R	1995																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																				
A6	Belém (PA)	H	517	177,931	176,609	55,715	4,629																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
	Santarém (PA)	R	1365																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																				
A7	Barcarena (PA)	H	848	273,376	285,832	29,786	5,947																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
	S. F. do Sul (SC)	R	2294																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																				
A8	Imbituba (SC)	R	2503	298,283	311,874	0,000	5,802																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
	Santos (SP)	R	1998																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																				
A9	Paranaguá (PR)	R	2219	264,438	276,487	40,475	5,999																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
	Cáceres (MT)	R	674																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																				
A10	Nueva Palmira (URU)	H	3055	135,311	107,504	123,982	0,000																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
	Rondonópolis (MT)	R	160																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																				
B1	Santos (SP)	F	1507	71,209	66,804	162,568	5,299																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
	São Simão (GO)	R	718																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																				
B2	Pederneiras (SP)	H	640	114,315	109,879	82,461	4,786																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
	Santos (SP)	F	498																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																				
B3	Colinas (TO)	R	1496	211,944	216,662	0,000	5,089																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
	Itaqui (MA)	F	973																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																				
B4*	Alvorada (TO)	R	897	160,664	160,096	33,571	4,724																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
	Itaqui (MA)	F	1554																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																				
B5	Araguari (MG)	R	1034	167,856	168,955	46,572	4,983																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
	Vitória (ES)	F	1290																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																				
B6*	Marabá (PA)	R	1863,42	231,370	236,163	59,633	4,944																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
	Belém (PA)	H	517																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																				
B7	Miritituba (PA)	R	1637,42	215,399	212,693	35,829	3,692																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
	Vila do Conde (PA)	H	1126																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																				
B8	S. F. do Sul (SC)	R	1826	217,604	227,520	90,040	6,167																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
	Santos (SP)	R	1516																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																				
B9	Paranaguá (PR)	R	1750,41	208,596	218,101	100,813	6,220																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
	Cáceres (MT)	R	523,45																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																				
B10	Nueva Palmira (URU)	H	3055	117,370	88,745	144,674	0,000																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
	Rondonópolis (MT)	R	734,2																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																				
C1	Santos (SP)	F	1507	139,637	138,349	75,295	5,036																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
	São Simão (GO)	R	1281																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																				
C2	Pederneiras (SP)	H	640	181,408	168,375	2,749	4,531																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
	Santos (SP)	F	498																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																				
C3	Miritituba (PA)	R	1054,38	145,702	139,954	98,977	4,261																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
	Vila do Conde (PA)	H	1114																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																				
C4*	Marabá (PA)	R	2079	257,060	263,024	36,601	4,931																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
	Belém (PA)	H	517																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																				
C5	Santarém (PA)	R	1281,19	167,943	166,166	99,989	4,719																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
	Barcarena (PA)	H	848																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																				
C6	Colinas (TO)	R	1711	237,566	243,451	17,054	5,076																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
	Itaqui (MA)	F	973																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																				
C7*	Alvorada (TO)	R	1199	196,653	197,725	0,000	4,650																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
	Itaqui (MA)	F	1554																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																				
C8	Imbituba (SC)	R	2586	308,174	322,216	18,260	5,776																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
	Paranaguá (PR)	R	2302,18																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																				
C9	Santos (SP)	R	2090	249,065	260,414	60,108	6,120																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
	Cáceres (MT)	R	719,84																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																				
C10	Nueva Palmira (URU)	H	3055	140,773	113,216	116,969	0,000																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
	Santos (SP)	F	1507																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																				
D1	Alto Araguaia (MT)	R	211,2	70,529	67,088	122,878	5,527																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
	Santos (SP)	F	1311																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																				
D2	Itiquira (MT)	R	137,23	65,520	61,292	129,180	5,430																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
	Santos (SP)	F	1421																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																				
D3	São Simão (GO)	R	588	98,823	93,681	58,607	4,876																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
	Pederneiras (SP)	H	640																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																				
D4	Santos (SP)	F	498	152,483	152,882	11,180	5,073																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
	Araguari (MG)	R	905																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																				
D5	Vitória (ES)	F	1290	217,398	214,915	15,293	3,707																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
	Porto Velho (RO)	R	1656																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																				
D6	Itacoatiara (AM)	H	1114	202,231	211,446	61,139	6,257																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
	S. F. do Sul (SC)	R	1697																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																				
D7	Santos (SP)	R	1388	165,408	172,945	68,062	6,471																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
	Paranaguá (PR)	R	1622																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																				
D8	Rio Grande (RS)	R	2126	253,355	264,900	0,000	5,959																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
	Cáceres (MT)	R	502																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																				
D9	Nueva Palmira (URU)	H	3055	114,813	86,073	101,255	0,000																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
	Santos (SP)	F	1507																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																				
D10	Alto Araguaia (MT)	R	211,2	70,529	67,088	122,878	5,527																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
	Santos (SP)	F	1311																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																				
D11*	Itiquira (MT)	R	137,23	65,520	61,292	129,180	5,430																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
	Santos (SP)	F	1421																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																				
D12	São Simão (GO)	R	588	98,823	93,681	58,607	4,876																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
	Pederneiras (SP)	H	640																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																				
D13	Santos (SP)	F	498	152,483	152,882	11,180	5,073																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
	Araguari (MG)	R	905																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																				
D14	Vitória (ES)	F	1290	217,398	214,915	15,293	3,707																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
	Porto Velho (RO)	R	1656																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																				
D15	Itacoatiara (AM)	H	1114	202,231	211,446	61,139	6,257																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
	S. F. do Sul (SC)	R	1697																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																				
D16	Santos (SP)	R	1388	165,408	172,945	68,062	6,471																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
	Paranaguá (PR)	R	1622																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																				
D17	Rio Grande (RS)	R	2126	253,355	264,900	0,000	5,959																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
	Cáceres (MT)	R	502																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																				
D18	Nueva Palmira (URU)	H	3055	114,813	86,073	101,255	0,000																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
	Santos (SP)	F	1507																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																				

Fonte: Elaborado pelo autor.

Com o auxílio do *software* SIAD, foram computados os resultados das três rodadas para cada centroide, apresentados na Tabela 2, ressalta-se que os valores destacados com o símbolo asterisco representam as alternativas que consideram a hidrovia do Rio Paraguai.

Os resultados da primeira rodada do Cenário A (Sorriso), em que são analisados os dois *outputs*, mostram que as rotas que integram a fronteira eficiente de produção são: A1 (via Porto de Santos, rodoferroviário), A9 (via Santos, rodoviário) e A11 (via Nueva Palmira, rodohidroviário pela hidrovia do Rio Paraguai). Porém, ao considerar apenas as rotas eficientes da amostra, a rota A1 é a melhor alternativa entre as três, por apresentar o maior valor da eficiência composta normalizada e da eficiência padrão. As razões entre a alternativa A11 não ser a melhor se devem à grande extensão da hidrovia, haja vista que, ao comparada com a rota A1, as mesmas possuem distâncias rodoviárias semelhantes, entretanto, a ferrovia localizada na rota A1 chega a ser três vezes menor que a hidrovia do Rio Paraguai, acarretando uma maior economia de tempo. Além disso, a rota A11 constitui um falso-positivo por apresentar valor de eficiência padrão e invertida iguais, bem como valor da composta normalizada baixo. Isso se deve pela rota possuir valores destoantes em seus *outputs*, como a maior economia no custo de transporte e a pior na economia de tempo, sendo a última o fator prejudicial em sua avaliação de eficiência global.

Na segunda rodada do Cenário A (Sorriso), analisando apenas a economia de frete, o resultado sugere as rotas A1 e A11 como eficientes. Isso se deve aos custos envolvidos na multimodalidade do transporte, a qual reduz significativamente não apenas o frete total, mas também os custos de acidente e emissão de CO₂e.

O resultado da terceira rodada do Cenário A (Sorriso), a qual analisa a economia de tempo, sugere que as rotas A1, A9 e A11 são as eficientes da amostra. Entretanto, a melhor alternativa, entre estas, é a A1, por apresentar maior valor da composta. Vale lembrar que a rota A11, novamente, apresenta um falso-positivo, o que indica a eficiência devido a certas particularidades matemáticas na relação *input* e *output*, o que pode gerar uma falsa eficiência real. Isso se deve ao fato de que, apesar de possuir menores valores de *input*, possui a menor economia de tempo, devido à velocidade de operação e a distância demasiada da hidrovia do Rio Paraguai.

É possível observar que a subtração, ou adição, da variável economia do custo de transporte e tempo (*output*) influenciou de forma significativa as análises de eficiência das rotas neste centroide. Além disso, a alternativa que usa a hidrovia do Rio Paraguai, neste centroide, apresentou o melhor resultado para a rodada com o *output* economia do custo de transporte. Porém, se for considerada apenas a economia de tempo como *output* ou a combinação entre os dois *outputs*, existem rotas sem a hidrovia em análise que se mostraram melhores.

Tabela 2. Análise de resultados - DEA

Cenário	DMU	1ª Rodada			2ª Rodada			3ª Rodada		
		Padrão	Invertida	Comp.	Padrão	Invertida	Comp.	Padrão	Invertida	Comp.
A	1	1,000	0,467	0,766	1,000	0,435	0,783	1,000	0,467	0,766
	2	0,756	1,000	0,378	0,756	0,575	0,590	0,756	0,652	0,552
	3	0,573	1,000	0,287	0,573	0,759	0,407	0,573	0,842	0,366
	4	0,883	0,584	0,650	0,883	0,496	0,694	0,882	0,584	0,649
	5	0,525	0,900	0,313	0,525	0,828	0,348	0,525	0,900	0,313
	6	0,729	0,671	0,529	0,729	0,597	0,566	0,729	0,671	0,529
	7	0,796	0,916	0,440	0,475	0,916	0,279	0,796	0,916	0,440
	8	0,682	1,000	0,341	0,435	1,000	0,217	0,682	1,000	0,341
	9	1,000	0,798	0,601	0,545	0,798	0,373	1,000	0,798	0,601
	10	0,843	0,887	0,478	0,491	0,887	0,302	0,843	0,887	0,478
	11*	1,000	1,000	0,500	1,000	0,454	0,773	1,000	1,000	0,500
B	1	1,000	0,308	0,846	1,000	0,308	0,846	1,000	0,308	0,846
	2	0,623	0,498	0,562	0,623	0,494	0,564	0,623	0,498	0,562
	3	0,336	1,000	0,168	0,336	1,000	0,168	0,336	0,917	0,209
	4	0,443	0,727	0,358	0,443	0,721	0,361	0,443	0,703	0,370
	5	0,424	0,739	0,343	0,424	0,739	0,343	0,424	0,725	0,349
	6	0,308	1,000	0,154	0,308	1,000	0,154	0,308	1,000	0,154
	7	0,331	1,000	0,165	0,331	0,963	0,184	0,331	1,000	0,165
	8	0,730	0,963	0,383	0,327	0,963	0,182	0,730	0,963	0,383
	9	1,000	0,800	0,600	0,394	0,800	0,297	1,000	0,800	0,600
	10	0,788	0,924	0,432	0,341	0,924	0,209	0,788	0,924	0,432
	11*	0,753	1,000	0,376	0,753	0,507	0,623	0,753	1,000	0,376
C	1	1,000	0,487	0,756	1,000	0,453	0,773	1,000	0,487	0,756
	2	0,807	1,000	0,403	0,772	0,850	0,461	0,807	0,667	0,570
	3	1,000	0,551	0,724	0,963	0,473	0,745	0,961	0,551	0,705
	4	0,543	0,906	0,319	0,543	0,834	0,355	0,543	0,906	0,319
	5	1,000	0,605	0,697	0,835	0,545	0,645	0,832	0,605	0,613
	6	0,605	0,913	0,346	0,588	0,790	0,399	0,605	0,825	0,390
	7	0,710	1,000	0,355	0,710	1,000	0,355	0,710	0,714	0,498
	8	0,696	1,000	0,348	0,453	1,000	0,227	0,696	1,000	0,348
	9	0,854	0,890	0,482	0,509	0,890	0,309	0,854	0,890	0,482
	10	1,000	0,808	0,596	0,561	0,808	0,376	1,000	0,808	0,596
	11*	1,000	1,000	0,500	1,000	0,457	0,772	1,000	1,000	0,500
D	1	1,000	0,213	0,893	1,000	0,206	0,897	1,000	0,213	0,893
	2	0,916	0,286	0,815	0,739	0,278	0,730	0,916	0,286	0,815
	3	0,828	0,268	0,780	0,796	0,259	0,769	0,828	0,268	0,780
	4	0,528	0,419	0,555	0,528	0,390	0,569	0,528	0,419	0,555
	5	0,342	0,637	0,352	0,342	0,602	0,370	0,342	0,637	0,352
	6	0,240	1,000	0,120	0,240	0,858	0,191	0,240	1,000	0,120
	7	0,705	0,798	0,453	0,258	0,798	0,230	0,705	0,798	0,453
	8	1,000	0,653	0,674	0,315	0,653	0,331	1,000	0,653	0,674
	9	0,766	0,763	0,502	0,270	0,763	0,253	0,766	0,763	0,502
	10	0,437	1,000	0,219	0,206	1,000	0,103	0,437	1,000	0,219
	11*	0,545	1,000	0,272	0,545	0,453	0,546	0,545	1,000	0,272

*As rotas marcadas são as que utilizam a hidrovia do Rio Paraguai.

Fonte: Elaborado pelo autor.

O Cenário B (Primavera do Leste) indica as rotas eficientes para as três rodadas. Verifica-se que, apesar de não ser a mais eficiente no referido centroide, segundo o cálculo DEA, a mesma deve ser levada em consideração pelo uso de sua multimodalidade, reduzindo assim emissões de CO₂e e custo de acidente, devendo ao operador logístico ponderar a sua eficiência ambiental. A hidrovía do Rio Paraguai tem considerável potencial para as três rodadas, haja vista que das rotas que a superam (A1, A9 e A10) apenas a A1 utiliza a multimodalidade, sendo as demais prejudiciais ao meio ambiente, visto que ambas utilizam apenas o transporte rodoviário.

O Cenário C (Sinop) indica como eficientes as rotas C1 (via Santos, rodoferroviária, através de Rondonópolis), C3 (via Vila do Conde, rodohidoviária), C5 (via Barcarena, rodohidoviário), C10 (via Santos, exclusivo rodoviário) e C11* (via Nueva Palmira, rodohidoviário) para a primeira rodada, sendo a C11* um falso-positivo devido às mesmas condições expostas no Cenário A. A melhor rota em função do valor da composta é a C1. Já a segunda rodada apresentou as rotas C1 e C11* como eficientes, onde a melhor é a C1 em função da composta, entretanto, a rota C11* difere em 0,001 da primeira, sendo assim melhor que as demais rotas nas questões socioambientais. Por fim, na terceira rodada, as rotas eficientes são C1, C10 e C11*, sendo a melhor, dentre estas, a rota C1. A rota C11* é novamente um falso-positivo, visto que a mesma possui a menor economia de tempo, sendo compensada pelos baixos valores de *input*.

Verifica-se que a hidrovía do Rio Paraguai, no Cenário C, tem potencial de economia de frete, porém existem alternativas que possuem multimodalidade com distâncias menores do que a rota em análise, economizando assim o tempo despendido de transporte. Vale ressaltar que para este centroide há um maior número de rotas que utilizam hidrovias (C2, C3, C4 e C5), e, ainda assim, a hidrovía proposta possui o menor número de custo de acidente e emissão de CO₂e.

1068 Para o Cenário D (Rondonópolis), observa-se que a rota que utiliza a hidrovía do Rio Paraguai não é eficiente e nem possui potencial de uso em nenhuma das três rodadas geradas. Isso se deve às alternativas multimodais mais eficazes, tanto no quesito frete quanto tempo, do que a rota em análise e, também, devido à localização da cidade Rondonópolis ser um polo de transbordo ferroviário.

Observa-se uma significativa economia de frete nas rotas que utilizam a hidrovía do Rio Paraguai. Entretanto, devido às suas rotas com grandes distâncias, sua eficiência global é prejudicada por um maior acréscimo no tempo de transporte, sendo um fator a ser isolado e pesquisado com empresas do ramo para ver se prejudicaria as exportações da *commodity* estudada. Por fim, vale ressaltar que as rotas A1, B1, C1 e D1 possuem maior eficiência global devido à posição estratégica de Rondonópolis, sendo a mesma utilizada como entroncamento das rodovias BR-163 e BR-164, além de possuir, também, acesso ferroviário através da Ferronorte.

4 DISCUSSÃO

Em relação ao estudo proposto, o presente artigo se diferencia de Gonçalves *et al.* (2015) por analisar rotas e valores de custo de transportes condizentes com o mercado atual, com uma única carga em análise, a soja mato-grossense, comparando rotas recém-adotadas e a possibilidade de adoção da hidrovía do Rio Paraguai como um corredor logístico de larga escala, com o canal de longo curso, superior a dois mil quilômetros, podendo assim ser ponderada pelo tempo de transporte, essencial para o agronegócio brasileiro, visando a redução de emissões de CO₂e e custo de acidentes envolvidos nesse segmento visando a melhoria socioambiental desse segmento.

Assim como no trabalho de Gonçalves *et al.* (2015), na análise da terceira rodada, a qual avalia a Economia de Custo de Transporte, observa-se que as rotas que utilizam hidrovias são prejudicadas devido à velocidade de operação do modo de transporte hidrovíario, sendo um ponderador decisivo dependendo do tipo de carga em que se deseja

transportar, entretanto, há a possibilidade de utilização de armazéns flutuantes, sendo necessários outros estudos de pesquisa direta com os grandes produtores da possível adoção ou não deste meio de transporte, como realizado pelos autores Delai *et al.* (2017).

Haja vista a análise dos resultados, ressalta-se que o transporte hidroviário proporciona diversos benefícios econômicos, como ressaltam os *stakeholders* abordados por Schulz *et al.* (2017). O Plano Hidroviário Estratégico - PHE (2013) pontua os pilares que garantem o êxito do transporte interno por hidrovia, são eles: a economia de escala, com o transporte de grandes volumes de carga em um único comboio e transportes de longa distância; um sistema de transporte competitivo e sustentável, com baixo risco (e custo pontuado neste artigo) de acidente, alta confiabilidade, baixo custo de transporte em relação aos demais meios, possui um nível de serviço adequado e alta competitividade para o mercado de transporte.

E, para que ocorram tais êxitos, é necessário um sistema fluvial navegável e com infraestrutura adequada, como a garantia de profundidade mínima, vazões máximas adequadas para a navegação, conexão adequada para outros modos de transporte, a garantia de navegação frente às mudanças climáticas, controle e segurança à navegação, e, por fim, uma governança clara com instituições focadas na sustentabilidade (PHE, 2013). Posto isso, Miranda (2008) e Minotti (2018) definem a hidrovia do Rio Paraguai como um canal de longo curso, mas que exige manutenções para que seu uso possa ser efetuado com êxito.

Os resultados deste artigo comprovam o elevado potencial de uso da hidrovia do Rio Paraguai, o que reforça a sua importância para o agronegócio brasileiro, principalmente para o setor agrícola mato-grossense, implicando a necessidade de estabelecimento de políticas públicas que estimulem o seu desenvolvimento. O uso de rotas multimodais associadas à hidrovia do Rio Paraguai permitirá ganhos econômicos aos produtores e conseqüentemente ao país por conta do aumento da competitividade frente aos principais exportadores de soja como os EUA, ganhos sociais com a redução de acidentes em rodovias a qual reduz o custo do país com atendimento e assistência e, finalmente, ganhos ambientais ao país e ao mundo, com a redução de gases que contribuem com o aquecimento global como o CO₂.

1069

5 CONCLUSÃO

O método DEA se mostrou satisfatório nas análises de cada rodada, pois foi possível traçar a fronteira eficiente e a invertida, assim como as melhores rotas possíveis de serem adotadas, incluindo a hidrovia do Rio Paraguai ou não.

As rotas que utilizam a hidrovia foram eficientes nas análises na segunda rodada, avaliando apenas a Economia de Custo de Transporte, desconsiderando a economia de tempo, dos Cenários, exceto o Cenário D, devido às rotas que utilizam ferrovia possuírem distâncias até duas vezes menores do que as rotas que utilizam a hidrovia em análise. Essa rodada evidencia que os custos de transporte influenciam diretamente em relação à eficiência global dos cenários, prevalecendo o uso do Rio Paraguai, tendo em vista o baixo custo de frete do segmento hidroviário em relação aos demais, gerando também a economia de escala devido ao longo percurso e ausência da necessidade de transbordo adicional.

A partir disto, conclui-se que a hidrovia do Rio Paraguai tem potencial de uso devido à sua economia de frete, baixa emissão de CO₂ e custo de acidente, sendo necessária a constante manutenção da hidrovia devido aos bancos de areia, sazonalidade das chuvas na região de Mato Grosso, e curvas de pequenos raios, reforçando, portanto, a importância desse corredor logístico para o agronegócio mato-grossense.

Como sugestões de evolução deste trabalho, sugere-se a realização de uma pesquisa junto aos produtores da região de estudo para verificar o tempo de armazenagem atualmente praticado, a avaliação da possibilidade de uso de embarcações armazéns e a consideração dos destinos como sendo os países importadores e não os portos.

6 AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001 e agradecemos ao Instituto Mato-Grossense de Economia Agropecuária (IMEA) por fornecer os dados da soja oriunda do Estado.

REFERÊNCIAS

- ACOSTA, C. M. M.; SILVA, A. M. V. A.; LIMA, M. L. P. Aplicação de Análise Envoltória de Dados (DEA) para medir a eficiência em portos brasileiros. **Revista de Literatura de Transportes**, v. 5, n. 4, p. 88-102, 2011.
- AMOROSO, S.; CASTELLUCCIO, F.; MARITANO, L. A DEA-based transport heliports' efficiencies evaluation. **Aircraft Engineering and Aerospace Technology**, v. 87, n. 2, p. 131-138, 2015.
- ANTAQ. **Seminário da hidrovia do Rio Paraguai**. ANTAQ: Brasília, 2008.
- BANKER, R. D.; CHARNES, A.; COOPER, W. W. Some models for estimating technical and scale inefficiencies in data envelopment analysis. **Management Science**, v. 30, n. 9, p. 1078-1092, 1984.
- BERTOLOTO, R. F.; MELLO, J. C. C. B. S. Eficiência de portos e terminais privados brasileiros com características distintas. **Journal of Transport Literature**, v. 5, n. 2, p. 421, 2011.
- CHARNES, A.; COOPER, W. W.; RHODES, E. Measuring the Efficiency of Decision Making Units. **European Journal of Operational Research**, v. 2, n. 6, p. 429-444, 1978.
- CNT. Confederação Nacional de Transporte. **Pesquisa CNT de Ferrovias 2011**. Brasília, 2011.
- CNT. Confederação Nacional do Transporte. **Boletim estatístico**. Brasília, 2016.
- CNT. Confederação Nacional do Transporte. **CNT lança painel sobre acidentes rodoviários: veja os principais dados**. Brasília: CNT, 2019. Disponível em: <https://www.cnt.org.br/agencia-cnt/cnt-lanca-painel-sobre-acidentes-rodoviarios-veja-principais-dados>. Acesso em: 18 ago. 2020.
- CNT. Confederação Nacional do Transporte. **Pesquisa CNT da navegação interior 2013**. Brasília: CNT, 2013.
- CORREIA, R.; RATTON, P.; GUARNERI, H.; RATTON, E.; DE QUEIROZ, E. P. CONGRESSO NACIONAL DE TRANSPORTE AQUAVIÁRIO, CONSTRUÇÃO NAVAL E OFFSHORE, SOBENA, 26., Rio de Janeiro. **Anais [...]**. Rio de Janeiro: Sobena, 2016.
- DELAI, A. P. D.; DE ARAUJO, J. B.; DOS REIS, J. G. M.; DA SILVA, L. F. Armazenagem e ganhos logísticos: uma análise comparativa para comercialização da soja em Mato Grosso do Sul. **Revista em Agronegócio e Meio Ambiente**, v. 10, n. 2, p. 395-414, 2017. DOI <https://doi.org/10.17765/2176-9168.2017v10n2p395-414>
- DJORDJEVIĆ, B.; KRMAC, E. Evaluation of energy-environment efficiency of european transport sectors: non-radial DEA and TOPSIS approach. **Energies**, v. 12, n. 15, p. 2907, 2019.
- EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Dados econômicos sobre o cultivo da soja**. Disponível em: <https://www.embrapa.br/soja/cultivos/soja1/dados-economicos>. Acesso em: maio 2018.
- GONÇALVES, D. N. S.; ASSIS, T. F.; DEBROI, I. L.; SILVA, M. A. V. Avaliação da eficiência de alternativas de rotas de commodities com emprego de análise envoltória de dados. *In*: CONGRESSO NACIONAL DE PESQUISA EM TRANSPORTE DA ANPET, 29., 2015. **Anais [...]**. Ouro Preto, 2015.

- GUABIROBA, R. C. S. **Procedimento para definição de consórcios públicos responsáveis pela coleta de resíduos recicláveis domiciliares com base em medidas de eco eficiência**. 2013. Tese (Doutorado em Engenharia de Transportes) - Universidade Federal do Rio de Janeiro - COPPE, 2013.
- GUERRERO, M.; RE, M.; KAZIMIERSKI, L. D.; MENÉNDEZ, Á. N.; UGARELLI, R. Effect of climate change on navigation channel dredging of the Parana River. **International journal of river basin management**, v. 11, n. 4, p. 439-448, 2013.
- GUIMARÃES, G. V.; LUQUEZ, P. R.; FARIA, F. L. F.; SILVA, M. A. V. Influência do tipo de comboio em operações hidroviárias. **Revista Produção e Desenvolvimento**, v. 1, n. 2, p. 104-115, 2015.
- ILOS. **Especialistas em Logística e Supply chain**. 2019. Disponível em: <https://www.ilos.com.br/web/>. Acesso em: 04 jul. 2019.
- IMEA - Instituto Mato-Grossense de Economia Agropecuária. **Cálculo Logístico de Frete de 2018 [mensagem pessoal]**. 2019. Mensagem recebida por <catharina.ruiz93@gmail.com > em 14 de maio de 2019.
- IMEA. Instituto Mato-Grossense de Economia Agropecuária. **Valor bruto da produção agropecuária em Mato Grosso**. 2018. Disponível em: http://www.imea.com.br/imea-site/view/uploads/relatorios-mercado/7estimativa_VB-P_2017_3estimativa_VBP_2018.pdf. Acesso em: 25 set. 2018.
- JOÃO, A.; ROCHA, F. V.; VETTORAZI, A. C.; BARTHOLOMEU, D. Emissão de CO₂ na logística de exportação de soja do Mato Grosso: o caso das exportações pelo arco norte. **Research Gate**. 2016. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/314898926_EMISSAO_DE_CO2_NA_LOGISTICA_DE_EXPORTACAO_DE_SOJA_DO_MATO_GROSSO_O_CASO_DAS_EXPORTACOES_PELo_ARCO_NORTE. Acesso em: 25 set. 2018
- KUOSMANEN, T.; KORTELAJINEN, M. Measuring eco-efficiency of production with data envelopment analysis. **Journal of Industrial Ecology**, v. 9, n. 4, p. 59-72, 2005.
- LINS, M. P. E.; MEZA, L. A. **Análise envoltória de dados e perspectivas de integração no ambiente do Apoio à Decisão**. Rio de Janeiro: COPPE/UFRJ, 2000.
- MELLO, J. C. C. B. S.; MEZA, L. A.; GOMES, E. G.; SERAPIÃO, B. P.; LINS, M. P. E. Análise de Envoltória de Dados no estudo da eficiência dos Benchmarks para companhias aéreas brasileiras. **Pesquisa Operacional**, v. 23, n. 2, p. 325-345, 2003.
- MENOTTI, P. G. T. The Paraná-Paraguay Fluvial Corridor (Argentina). In: FINLAYSON, C.; MILTON, G.; PRENTICE, R.; DAVIDSON, N. (Ed.). **The Wetland Book**. Springer, Dordrecht. Disponível em: https://doi.org/10.1007/978-94-007-4001-3_242. Acesso em: 20 ago. 2020.
- MEZA, L. A.; BIONDI NETO, L.; RIBEIRO, P. G. SIAD v. 2.0. Sistema Integrado de Apoio à Decisão: uma implementação computacional de modelo de análise envoltória de dados e um método multicritério. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE PESQUISA OPERACIONAL, 37., Gramado, 2005. **Anais [...]**. Gramado: Sobrapo, 2005.
- MIRANDA, L. M. **Contribuição a um modelo de análise multicritério para apoio à decisão da escolha do corredor de transporte para o escoamento da produção de grãos agrícolas de Mato Grosso**. Tese (Doutorado) - COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2008.
- MINISTÉRIO DOS TRANSPORTES. **PNL - Plano Nacional de Logística**. Brasília, 2018.
- MINISTÉRIO DOS TRANSPORTES. **Relatório PHE - Plano Hidroviário Estratégico**. Brasília, 2013.

SAEEDI, H.; BEHDANI, B.; WIEGMANS, B.; ZUIDWIJK, R. Assessing the technical efficiency of intermodal freight transport chains using a modified network DEA approach. **Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review**, v. 126, p. 66-86, 2019.

SANTOS, J. T. A. N.; CARDOSO, P.; MOITA, M. H. V. Análise envoltória de dados como mecanismo de avaliação e monitoramento do desempenho do programa de manutenção de hidrovias interiores. **Journal of Transport Literature**, v. 6, n. 2, p. 66-86, 2012.

SCHULZ, C.; MARTIN-ORTEGA, J.; IORIS, A. A.; GLENK, K. Applying a 'Value Landscapes Approach' to conflicts in water governance: the case of the Paraguay-Paraná Waterway. **Ecological economics**, v. 138, p. 47-55, 2017.

SENRA, L. F. A. C.; NANJI, L. C.; MELLO, J. C. C. B. S.; MEZA, L. A. Estudo sobre método de seleção de variáveis em DEA. **Pesquisa Operacional**, v. 27, n. 2, p. 191-207. 2007.

SILVEIRA, J. Q.; MEZA, L. A.; MELLO, J. C. C. B. S. Use of DEA and inverted frontier for airlines benchmarking and anti-benchmarking identification. **Production**, v. 22, n. 4, p. 788-795, 2012.

SOUZA JR, J. N. C. **Avaliação da eficiência dos portos utilizando análise envoltória de dados: um estudo de caso dos portos da região do Nordeste**. Fortaleza: Universidade Federal do Ceará, 2010.

SOUZA, R. O.; CREMASCO, C. P.; GABRIEL FILHO, L. R. A. Análise dos valores de frete da soja a granel nos sistemas unimodal e multimodal de transporte. **Revista em Agronegócio e Meio Ambiente**, v. 9, n. 4, p. 819-837, 2016. DOI <https://doi.org/10.17765/2176-9168.2016v9n4p819-837>

WBCSD. World Business Council for Sustainable Development. Measuring Eco-Efficiency. **A Guide to Reporting Company Performance**. Geneva, Switzerland, 2000.