








REDUÇÃO DAS EMISSÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA COM O EMPREGO DA LOGÍSTICA COLABORATIVA: UMA ANÁLISE A PARTIR DO TRANSPORTE DE SOJA NO ESTADO DE MATO GROSSO DO SUL, BRAZIL

REDUCTION OF GREENHOUSE GAS EMISSIONS THROUGH THE USE OF COLLABORATIVE LOGISTICS: AN ANALYSIS BASED ON THE TRANSPORTATION OF SOYBEANS IN THE STATE OF MATO GROSSO DO SUL, BRAZIL

Davi Guimarães Soares ¹ , Alba Miriam Monteiro ² , José Francisco dos Reis Neto ³ , Ademir Kleber Morbeck de Oliveira ⁴ , Higo José Dalmagro ⁵ .

Resumo - O transporte contribui para um aumento da competitividade comercial, em contrapartida, necessita de ações para mitigar os impactos ambientais causados pela atividade, especialmente as emissões dos gases de efeito estufa (GEE). Diante disso, este artigo teve como objetivo avaliar a contribuição ambiental que a utilização da prática da logística colaborativa pode fornecer para o transporte rodoviário da soja sul-mato-grossense para exportação. A metodologia baseou-se em uma pesquisa quali-quantitativa onde foram levantados os fluxos de exportação de soja e importação de fertilizantes, com origem no Estado de Mato Grosso do Sul (MS, Brasil) com destino aos portos de Santos, Paranaguá e São Francisco do Sul. Foram analisados dois cenários: o primeiro (cenário atual), levou em consideração que parte dos veículos retornam vazios para a origem e, o segundo (cenário ideal), onde 100% das viagens de volta retornariam com fertilizantes para o Mato Grosso do Sul, que seria o resultado da aplicação da logística colaborativa. Foram consideradas duas composições veiculares de carga (CVC) sendo a primeira com 7 eixos e a outra com 9 eixos. Os resultados mostraram a melhor eficiência dos conjuntos com 9 eixos que, além de necessitarem de 23,98% menos viagens, proporcionariam uma taxa de consumo de combustível por tonelada transportada, em média, 13,45% menor para os trajetos de ida e volta carregado e de 10,69% quando retornam vazias. A análise da eficiência ambiental

¹Doutor em Meio Ambiente e Desenvolvimento Regional, Docente do Programa de Pós-Graduação em Meio Ambiente e Desenvolvimento Regional da Universidade Anhanguera-Uniderp, Campo Grande, MS, Brasil. E-mail Correspondência: davi.soares@cogna.com.br

²Doutoranda em Meio Ambiente e Desenvolvimento Regional, Programa de Pós-Graduação em Meio Ambiente e Desenvolvimento Regional da Universidade Anhanguera-Uniderp, Campo Grande, MS, Brasil. E-mail: alba2023@outlook.com.

³Doutor em Economia de La Empresa, Docente do Programa de Pós-Graduação em Agronegócio Sustentável da Universidade Anhanguera-Uniderp, Campo Grande, MS, Brasil. E-mail: jfreisneto@terra.com.br

⁴Doutor em Economia e Recursos Naturais, Docente do Programa de Pós-Graduação em Meio Ambiente e Desenvolvimento Regional da Universidade Anhanguera-Uniderp, Campo Grande, MS, Brasil. E-mail: akmorbeckoliveira@gmail.com.

⁵Doutor em Física Ambiental, Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Meio Ambiente e Desenvolvimento Regional da Universidade Anhanguera-Uniderp, Campo Grande, MS, Brasil. E-mail: higo.dalmagro@cogna.com.br

permitiu identificar que a logística colaborativa contribuiria para uma redução anual das emissões de 6.336.631,17 kgCO₂ para os conjuntos com 7 eixos e de 5.978.283,74 kgCO₂ para as composições com 9 eixos. Com base nos resultados, é possível concluir que a logística colaborativa promoveria significativas contribuições para a redução das emissões de CO₂, sendo uma importante pauta para ampliar a agenda de discussões do setor e no desenvolvimento de futuras pesquisas relacionadas ao tema.

Palavras-chave: Sustentabilidade ambiental; Desafios e oportunidades; Prática sustentável; Redução das emissões; Contribuição ambiental.

Abstract - The transportation sector contributes to increased commercial competitiveness, however, it requires actions to mitigate environmental impacts, especially greenhouse gas emissions (GHG). In this context, this article aimed to assess the environmental contribution that the use of collaborative logistics practices can provide for the road transport of soybeans from Mato Grosso do Sul, Brazil, for export. The methodology was based on a qualitative and quantitative study where the flows of soybean exports and fertilizer imports from Mato Grosso do Sul (MS, Brazil) to the ports of Santos, Paranaguá, and São Francisco do Sul were surveyed. Two scenarios were analyzed: the first (current scenario) considered that some vehicles return empty to the origin, and the second (ideal scenario) where 100% of the return trips would carry fertilizers back to Mato Grosso do Sul, resulting from the application of collaborative logistics. Two freight vehicle compositions (CVC) were considered, the first with 7 axles and the other with 9 axles. The results showed that the 9-axle sets were more efficient, requiring 23.98% fewer trips and providing an average fuel consumption rate per ton transported that was 13.45% lower for round trips loaded and 10.69% lower when returning empty. The analysis of environmental efficiency identified that collaborative logistics would contribute to an annual reduction in emissions of 6,336,631.17 kgCO₂ for 7-axle sets and 5,978,283.74 kgCO₂ for 9-axle compositions. Based on the results, it can be concluded that collaborative logistics would significantly contribute to reducing CO₂ emissions, making it an important topic to expand sector discussions and the development of future research related to the subject.

Keywords: Environmental sustainability; Challenges and opportunities; Sustainable practices; Emission reduction; Environmental contribution.

1 INTRODUÇÃO

As mudanças climáticas provocadas pelas emissões de gases de efeito estufa (GEE), são um dos maiores desafios enfrentados pela humanidade. De acordo com o ITF, International Transport Forum (2023), as emissões de GEE do transporte cresceram mais do que qualquer outro setor nos últimos 50 anos e, para que ocorra uma mudança nesse cenário, é imperativo que haja uma descarbonização do setor, responsável pela emissão de 23% do dióxido de carbono (CO₂), caso contrário, as estimativas apontam que a participação do setor poderia atingir até 40% em 2030.

Para tanto, é necessário um esforço global para reduzir o aquecimento global, com foco multifacetado em diversas áreas-chave, dentre elas: energia, transportes, indústria, reflorestamento, tecnologias para captura e armazenagem de carbono (CAC), educação, inovação e pesquisa, políticas e acordos internacionais, economia circular, conservação de recursos naturais e governança (Feres, 2010). Pelo fato de estarem interconectadas, essas áreas demandam um esforço coordenado a nível global, nacional e local que envolve uma combinação de políticas, estratégias, inovações tecnológicas, ações individuais e coletivas, além de mudanças comportamentais que visem promover práticas sustentáveis para redução das emissões de GEE (Minx et al., 2021).

Uma diversidade de possibilidades foram estudadas nos últimos anos, que vão desde a modificação das fontes primárias da matriz energética (He et al., 2017) com a utilização de hidrogênio e eletrificação de veículos (Charabi et al., 2020) e bioenergia a partir de fontes biológicas renováveis (Albuquerque, 2022), até a redução do consumo de energia na movimentação de mercadorias (Ellram; Murfield, 2017), transferência modal e multimodalidade (Kaack et al., 2018), roteamento de veículos

(Mckinnon, 2016) e de transporte colaborativo (Soliani et al., 2019; Cleophas et al., 2019), que possibilita ganhos significativos no aproveitamento dos recursos, na comunicação e visibilidade das cargas e na formação de ciclos com alta produtividade combinadamente com frete-retorno.

Independente das alternativas, nota-se um ponto em comum entre elas, que converge para necessidade de uma ação conjunta entre agentes externos, empresas, parceiros comerciais e prestadores de serviços logísticos no desenvolvimento de um sistema integrado para promover um transporte ambientalmente eficiente (Ghisolfi et al., 2019). É essa necessidade que a logística colaborativa busca atender, fornecendo um serviço superior ao menor custo, por meio da criação de uma cadeia integrada de membros e atividades, com o objetivo de reduzir custos, flexibilizar e agilizar a entrega de mercadorias, melhorar a qualidade e a eficiência da cadeia logística e do serviço prestado ao cliente (Seo et al., 2016).

De acordo com Lai et al. (2020), ao invés de competirem entre si como entidades autônomas, as empresas reconhecem que podem alcançar benefícios mútuos ao colaborar e coordenar suas atividades, desenvolvendo parcerias estratégicas, alianças, redes de fornecimento ou outros tipos de cooperação, com foco na construção e consolidação de um relacionamento de longo prazo. Nesse modelo, as empresas trabalham harmoniosamente, compartilhando informações, recursos e processos para alcançar a eficiência e eficácia na entrega de seus produtos e serviços.

No entendimento de Jimenez-Jimenez et al. (2018), a logística colaborativa facilita a tomada de decisão conjunta na formulação de estratégias que promovam o aumento do desempenho operacional e permitam uma integração vertical, como fonte de vantagem competitiva, que é obtida por meio da realização sincronizada das atividades, proporcionando um processo logístico mais eficiente.

Importa destacar que o efeito da utilização da prática da logística colaborativa não se concentra somente na redução de custos logísticos, melhora na eficiência dos veículos de carga e do nível de serviço. De maneira geral, a prática fornece uma perspectiva adicional sobre a questão ambiental, aumentando assim o benefício da sua utilização, como mostrado por Soliani et al. (2020) que, analisando os fluxos do transporte de soja e fertilizantes do Estado do Mato Grosso sob a ótica ambiental, identificaram uma redução da ordem de 29,48kg/CO₂ por tonelada transportada para o porto de Santos e uma redução de 14,38kg/CO₂ para o porto de Paranaguá.

Sob essa ótica, o presente artigo tem como objetivo avaliar a contribuição ambiental que a utilização da prática da logística colaborativa pode fornecer para o transporte rodoviário da soja sul-matogrossense para exportação.

2 REVISÃO DE LITERATURA

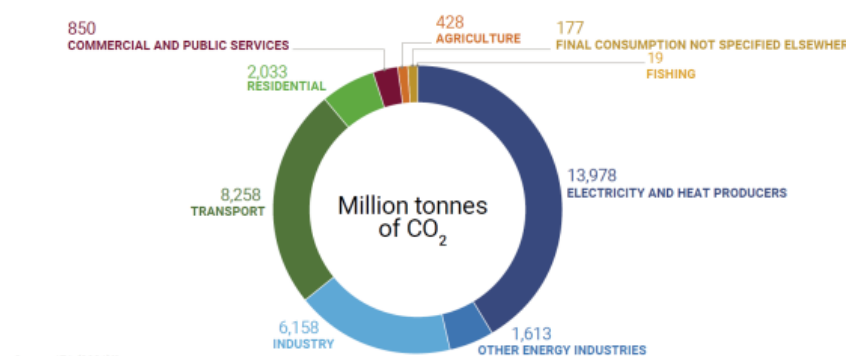
Fornecendo serviços e infraestrutura para a mobilidade bens e pessoas, o transporte tem sido um acelerador transversal que tem impulsionado o progresso em direção a outros objetivos essenciais para o alcance das metas estabelecidas na Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável e o Acordo de Mudança Climática de Paris. Potenciais sinergias obtidas entre um transporte mais sustentável e os Objetivos do Desenvolvimento Sustentável (ODS) são um caminho para resolver os *trade-offs* e a fragmentação do setor de transportes, exigindo maior colaboração entre os diferentes integrantes da cadeia logística.

Responsável pelo abastecimento das cadeias regionais e globais, o transporte contribui para um aumento da competitividade comercial e da resiliência às oscilações externas e sistêmicas e em contrapartida necessita de ações para mitigar os impactos causados pela atividade, especialmente as emissões dos gases de efeito estufa (GEE). De acordo com o Relatório Interagências para a Segunda Conferência Global de Transportes Sustentáveis (United Nations, 2021), no ano de 2020, o setor foi

responsável por 24% das emissões diretas de CO₂, 57% da demanda global de petróleo e 28% do consumo total de energia.

Ao mesmo tempo em que conecta o produtor ao consumidor final, o transporte contribui para o aumento das emissões de GEE ficando em 2º lugar no ranking por setor em 2018 (Figura 1).

Figura 1: Emissões de CO₂ em 2018 por setor.



Fonte: United Nations (2021).

Considerando o período de 2000 a 2018, a emissão de CO₂ pelos veículos rodoviários de carga cresceu mais de 40% passando de cerca de 1,7 Gt (gigatoneladas de CO₂) para aproximadamente 2,4 Gt, sendo o segundo meio poluidor do setor (IEA, International Energy Agency, 2022). Nessa perspectiva, melhorar a otimização dos veículos de carga é uma importante fonte para garantir a sustentabilidade e gerar benefícios ambientais. Sob a perspectiva da ecoeficiência, a abordagem dessas questões consolida-se cada vez mais como um critério fundamental para o sucesso empresarial, pois visam reduzir a intensidade dos recursos utilizados, minimizando os impactos ambientais gerados (Soliani et al., 2020).

Para Bartholomeu et al. (2016), cabe ao setor de transportes desenvolver estratégias para a criação de um transporte sustentável com baixos índices de emissão de CO₂, mudança essa que se torna cada vez mais irreversível. Segundo os autores, a substituição do combustível é uma das alternativas para mitigar as emissões de GEE pelo setor de transportes, com destaque para o biodiesel (combustível obtido principalmente a partir de matérias-primas vegetais - biomassa, utilizado para substituir o óleo diesel) (SEBRAE, Serviço Brasileiro de Apoio às Micro e Pequenas Empresas, 2013) como combustível com menos carbono-intensivo, inserido no Programa Nacional do Biodiesel que estabelece diretrizes para o aumento gradativo da parcela de biodiesel no diesel.

Entretanto, a transição energética para uma produção de energia mais limpa e sustentável não pode ser resolvida de maneira repentina. De acordo com Sureeyatanapas et al. (2018), as empresas devem ter conhecimento sobre seus impactos ambientais ao longo da cadeia logística por serem considerados os principais contribuintes nas emissões globais de GEE.

Partindo-se desse ponto, sugere-se a modificação das fontes primárias da matriz energética, buscando uma substituição progressiva e garantindo a estabilidade, resiliência e eficiência das cadeias globais de produção. Essa melhoria da eficiência energética é um caminho para descarbonização dos sistemas econômicos e conduz para uma menor dependência das fontes fósseis tradicionais como carvão, petróleo e gás natural (Enelgreenpower, Grupo, 2022).

Sob diferentes óticas, esse processo de descarbonização é definido pela redução ou retirada das emissões de carbono na atmosfera, obtendo-se uma economia a nível global visando por meio da alteração da matriz energética, com a diminuição ou eliminação do carbono na geração de energia (Iberdrola, Grupo, 2022).

Segundo Liimatainen et al. (2014), a redução da intensidade de carbono na atmosfera é obtida

pela razão entre a quantidade das emissões de GEE pelo valor adicionado bruto (VAB). Sob essa ótica, é importante observar que uma quantidade menor de emissões promoveria uma redução da intensidade de carbono na atmosfera, o que caracterizaria um processo de descarbonização.

Por ser o segundo maior contribuinte de GEE (IEA, International Energy Agency, 2022), os sistemas logísticos têm um papel importante nesse processo o que torna a descarbonização do setor uma tendência inevitável (He et al., 2017). No comparativo com os modelos que utilizam combustíveis fósseis, os sistemas com baixa emissão de carbono enfatizam uma maior sustentabilidade ao setor e economia de energia, além de promover uma redução dos GEE.

Para Zaluski et al. (2019), os modelos de fluxo tradicionais têm o objetivo de reduzir os custos e melhorar a eficiência operacional do sistema e a inserção de questões ambientais no processo de avaliação de desempenho, promovendo um equilíbrio entre os aspectos econômicos e ambientais.

Nessa perspectiva, torna-se importante estabelecer políticas mitigatórias para o setor de transportes, com foco não somente no transporte de passageiros, mas em propostas para promover a integração entre os meios de transporte, possibilitar as transferências modais e de regulamentações para a economia de combustível dos veículos de transporte de cargas (Huizenga; Peet, 2017).

Kaack et al. (2018) destacam que países como os Estados Unidos da América, Canadá, China e Japão já adotam essas medidas para mitigar as emissões de GEE do setor. Além disso, os autores reforçam que a descarbonização do setor só pode ser atingida mediante combinação entre a transferência modal com a adoção de outras estratégias. Mckinnon (2016) corrobora com essa narrativa, citando cinco alternativas que auxiliam nesse processo: (1) reduzir a demanda por transporte; (2) otimizar o processo de carregamento; (3) aumentar a eficiência dos veículos; (4) reduzir a quantidade de carbono dos combustíveis; e, (5) a mudança para outros modos de transporte com baixa intensidade de carbono.

De acordo com Eom et al. (2012), existe uma forte relação entre o crescimento da atividade de frete e o crescimento econômico, dificultando a redução da demanda pelo transporte de cargas, uma vez que a atividade é de extrema importância para o desenvolvimento de economias de baixa renda. Uma estratégia para esse caso seria a mudança estrutural na gestão das cadeias de suprimentos, com alteração no padrão origem-destino, redução da demanda de bens de consumo e implementação de novas tecnologias de produção (Mckinnon, 2016).

Em relação a otimização do processo de carregamento, Teter et al. (2017) descrevem que essa estratégia se baseia na implementação de novas tecnologias (máquinas, equipamentos e processos, entre outras) para redução do tempo de expedição das mercadorias, além do desenvolvimento de embalagens mais eficientes com modulações compatíveis com as dimensões dos veículos de transporte de cargas.

Para Mckinnon (2016), os ganhos de eficiência podem ser obtidos pelo roteamento eficiente e a colaboração na cadeia de suprimentos, melhorando o uso da capacidade modal e reduzindo o índice de backhauling (retornos vazios). Figueiredo e Eiras (2007), pelo mesmo viés, em estudos relacionados ao transporte colaborativo (logística colaborativa), demonstram ganhos significativos relacionados à um melhor aproveitamento dos recursos, melhoria na comunicação e na visibilidade de cargas e formação de ciclos com alta produtividade combinadas com cargas de retorno.

De acordo com Kaack et al. (2018), combustíveis com baixo teor de carbono ou “*drop-in*” são uma importante fonte para a descarbonização do setor de transportes, pois possuem características semelhantes aos utilizados atualmente, além de reduzir a infraestrutura para a armazenagem e distribuição dos mesmos e a necessidade de redesenho dos motores atuais. Já os combustíveis à base de biomassa exigem um menor esforço e transformação no uso da terra durante o seu ciclo de vida (Bann et al., 2017).

Para a estratégia relacionada à mudança de frete para modos de baixa intensidade de carbono

há uma diferença significativa entre os modos de transporte, indicando que a utilização de modais como ferroviário e aquaviário são mais eficientes para descarbonização do setor de transportes (Dong et al., 2018). Nesses casos, não existe a necessidade de grandes investimentos por parte das empresas, sendo uma abordagem mais simples e em alguns casos, só com a transferência modal em parte do trajeto já é possível reduzir a intensidade de carbono (Stadieseifi et al., 2014).

Outrossim, é possível observar que essas alternativas convergem para a necessidade de uma ação conjunta entre os agentes externos e as próprias empresas, criando um sistema integrado de infraestrutura logística para promover um transporte ambientalmente mais eficiente (Ghisolfi et al., 2019).

2.1 A logística colaborativa

O conceito de logística colaborativa surge da necessidade de estreitar as relações de colaboração entre empresas e parceiros comerciais, visando fornecer um serviço com qualidade superior ao menor custo (Tacla, 2003). Nesse ambiente, as empresas deixam de competir entre si como entidades autônomas e criam uma cadeia integrada de membros e atividades para a construção de um relacionamento de longo prazo com seus parceiros (Lai et al., 2020).

Proposta há mais de uma década, Ferrer et al. (2019) destacam que a logística colaborativa sempre se referiu à cadeia de suprimentos. Contudo, considera-se que há logística colaborativa quando duas ou mais empresas se reúnem para trabalhar conjuntamente, com o objetivo de melhorar a eficiência da cadeia de suprimentos, reduzir custos, flexibilizar e agilizar as entregas, melhorar a qualidade e o serviço prestado ao cliente (Seo et al., 2016).

Ferrer et al. (2019) reforçam a importância da integração dos envolvidos na definição de estratégias e planos operacionais cooperativos que resultem em importante fonte de vantagem competitiva para todos os agentes da cadeia. Em consonância, Almeida e Vieira (2013) acrescentam que a soma dos esforços operacionais gerados pelos envolvidos, conferem ao produto final um valor mais econômico, resultado do melhor equilíbrio econômico entre os pares diretos.

Nessa esteira, Pires (2016) destaca que a prática possibilita o intercâmbio entre as empresas mediante plataformas que impulsionem o aumento no ganho de capital e a redução de perdas. Esse processo ocorre por meio de transferência eletrônica de informações (EDI), sincronizando os ciclos de compras e vendas do consumidor com o ciclo produtivo dos fornecedores. Desta forma é possível reduzir os volumes de estoques e aumentar o nível de serviço oferecido (Ribeiro, 2004).

Com importante aplicação no transporte de cargas, a logística colaborativa torna-se uma extensão das empresas de transporte (PSL) e seus parceiros que, trabalhando simultaneamente, buscam promover a confiabilidade do serviço, com valor superior. No setor de transportes, os ganhos associam-se à uma melhora no aproveitamento dos recursos, na comunicação e na visibilidade de cargas, possibilitando o compartilhamento dos veículos de transporte de cargas (fluxos casados). Com a adoção dessa prática e dependendo da distância percorrida, a redução nos custos pode chegar a 15%, uma vez que elimina o retorno vazio do veículo para a sua origem (Figueiredo; Eiras, 2007). Além de promover esses benefícios para as empresas transportadoras ou os prestadores de serviços logísticos, os ganhos obtidos podem ser refletidos também em outros aspectos (Tabela 1).

Tabela 1 – Potenciais benefícios relacionados ao transporte colaborativo.

Benefícios para o Embarcador		
Nível de Serviço	Pontualidade das entregas	Aumento de até 35%
	<i>Lead-time</i> das entregas	Redução de até 75%
Custos Logísticos	Estoques	Redução de até 50%
	Transporte de cargas urgentes	Redução de até 20%
	Custos administrativos	Redução de até 20%
Benefícios para o Transportador		
Produtividade	Trechos vazios	Redução de até 15%
	Tempo de espera	Redução de até 15%
	Utilização da frota	Aumento de até 33%

Fonte: Figueiredo e Eiras (2007, p. 6).

No contexto ambiental, a prática da logística colaborativa contribui para a redução das emissões de GEE. Soliani et al. (2019) estudaram o potencial de redução das emissões de CO₂ a partir das operações de soja e fertilizantes, considerando as principais rotas de escoamento para os portos de Santos e Paranaguá. Com base em dois cenários, os autores identificaram um potencial de redução de aproximadamente 4.480.309,03 kg/CO₂ durante o ano de 2018, demonstrando que os benefícios relacionados à adoção dessa prática podem contribuir para sua maior utilização no agronegócio brasileiro.

3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

A metodologia baseou-se em uma pesquisa quali-quantitativa onde foram levantados os fluxos de exportação de soja e importação de fertilizantes, com origem no Estado de Mato Grosso do Sul (MS, Brasil) com destino aos portos de Santos, Paranaguá e São Francisco do Sul. Os dados foram coletados do banco de dados do Ministério do Desenvolvimento, Indústria, Comércio e Serviços (MDIC).

Os dados relativos à exportação de soja tiveram como referência, o ano-base de 2022, dos meses de janeiro a dezembro, com origem no Estado do Mato Grosso do Sul, Brasil (UF), para as Unidades da Receita Federal (URF) código 0817800 – Porto de Santos; 0917800 – Porto de Paranaguá e; 0927700 – Porto de São Francisco do Sul, posição (SH4)⁶, código 1201 – Soja, mesmo trituração (MDIC, Ministério do Desenvolvimento, Indústria, Comércio e Serviços, 2023a). Para a importação de fertilizantes, alterou-se somente o filtro para Capítulo (SH2), código 31 – Adubos (fertilizantes) (MDIC, Ministério do Desenvolvimento, Indústria, Comércio e Serviços, 2023b).

Para o frete-retorno, foram analisados dois cenários: o primeiro (C_1 - cenário atual), teve como base os percentuais adotados por Soliani et al. (2019) que identificaram que cerca de 61,5% dos veículos de carga que saíram do porto de Santos, e 76,4% dos veículos que partiram do porto de Paranaguá, retornaram com fertilizantes para a sua origem. A adoção desses percentuais se justifica, uma vez que, parte do trecho das rotas que foram analisadas pelos autores passa pelo Estado de Mato Grosso do Sul, tanto no trajeto de ida para os terminais portuários, quanto no trajeto de volta para a origem. Considerando que os autores não analisaram os veículos que partiram do porto de São Francisco do Sul,

⁶SH – Sistema Harmonizado, “método internacional de classificação de mercadorias, baseado em uma estrutura de códigos e respectivas descrições” (MDIC, Ministério do Desenvolvimento, Indústria, Comércio e Serviços, 2023c, s.p.).

foi adotado o percentual de 68,95%, que representa a média entre os dois percentuais. O segundo cenário (C_2 - cenário atual), levou em consideração que 100% das viagens de volta retornariam com fertilizantes para o Mato Grosso do Sul, que seria o resultado da aplicação da logística colaborativa.

As análises levaram em consideração duas composições veiculares de carga (CVC), sendo elas: de 7 eixos com cavalo-trator modelo Volvo FM 460 6x4 e de 9 eixos com cavalo-trator modelo Scania R450 6x4, conforme especificado no Anexo I da Portaria SUROC nº 17 (ANTT, Agência Nacional de Transporte Terrestres, 2023a).

Em relação a capacidade de carga, foram consideradas as informações contidas na resolução nº 211, de 13 de novembro de 2006 do Conselho Nacional de Trânsito (Contran) que indica o peso bruto total combinado (PBTC) de 57 toneladas para a CVC com 7 eixos e de 74 toneladas para a composição com 9 eixos. Em continuidade e, considerando que a tara (peso do conjunto sem carga) das composições pesa em média 19 toneladas para CVC de 7 eixos e 24 toneladas com 9 eixos, resultando em uma capacidade de carga (C_{cap}) de 38 toneladas para as CVC com 7 eixos e de 50 toneladas com 9 eixos.

Quanto ao rendimento (R), foram adotadas as médias estabelecidas na portaria supracitada, a saber: 2,00km/l para a CVC de 7 eixos e 1,725km/l para o conjunto com 9 eixos, para o conjunto carregado (R_c). Na opção vazia (R_v), os rendimentos adotados foram de 3,60km/l para a CVC com 7 eixos e de 2,90km/l com 9 eixos.

Para definição das distâncias percorridas por viagem (trajeto de ida e volta), foram levantados os dados de produção de soja dos municípios sul-mato-grossenses (IBGE, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2022) e as distâncias de cada município até os portos de Santos, Paranaguá e São Francisco do Sul (Rotas Brasil, 2023). Partindo-se desses dois dados, foi calculada a média ponderada das distâncias percorridas de cada um dos municípios produtores até os três terminais portuários para exportação analisados, que resultou em um trajeto médio (D_m) de 1.114,53km até o Porto de Santos, de 1.103,34km até o Porto de Paranaguá e de 1.190,52km até o Porto de São Francisco do Sul.

Em continuidade, o cálculo da quantidade total de viagens necessárias (T_v) levou em consideração os volumes de soja e fertilizantes movimentados em cada terminal portuário, bem como, a capacidade de carga de cada CVC, conforme as equações (1) e (2):

$$T_{vs} = \frac{V_s}{C_{cap}} \quad (1)$$

$$T_{vf} = \frac{V_f}{C_{cap}} \quad (2)$$

Onde:

T_{vs} = total de viagens necessárias para o transporte de soja;

V_s = carga total exportada de soja (t);

C_{cap} = capacidade de carga da CVC (t);

T_{vf} = total de viagens necessárias para o transporte de fertilizantes;

V_f = carga total importada de fertilizantes (t).

No tocante ao consumo total de combustível das CVC por viagem (C_v), foi feita uma adaptação da equação proposta por Soliani et al. (2019) (3):

$$C_v = \frac{D_m}{R_c} + p_v \frac{D_m}{R_v} + (1 - p_v) \frac{D_m}{R_c} \quad (3)$$

Onde:

C_v = consumo total de combustível por viagem (l);

D_m = trajeto médio até o porto (km);

R_c = rendimento da CVC carregada (km/l);

p_v = percentual de fretes-retorno vazios (%);

R_v = rendimento da CVC vazia (km/l).

Em continuidade, para o cálculo do total de combustível consumido pelas CVC para o transporte total dos produtos (soja e fertilizantes), foram adotadas duas equações, sendo: a primeira que considera o cenário atual (4) e a segunda, com a prática da logística colaborativa (5), conforme mostrado a seguir:

$$T_{comb}^{C1} = \left\{ \left[\frac{V^1 tm + V^2 tm}{C^{cap}} \right] + \left[\frac{p^v V^2 tm + V^1 tm}{R^v} \right] \right\} \quad (4)$$

$$T_{comb}^{C2} = \left\{ \left[\frac{V^1 tm + V^2 tm}{R^c} \right] + \left[\frac{p^{lc} V^2 tm + V^1 tm}{R^v} \right] \right\} \quad (5)$$

Onde:

T_{comb}^{C1} = total de combustível consumido sem a logística colaborativa (l);

T_{comb}^{C2} = total de combustível consumido com a logística colaborativa (l);

V^1 = carga total anual de soja (t);

tm = trajeto médio até o porto (km);

V^2 = carga total anual de fertilizantes (t);

C^{cap} = capacidade de carga da CVC (t);

p^v = porcentagem de frete-retorno vazio (%);

R^c = rendimento médio da CVC carregada (km/l);

R^v = rendimento da CVC vazia (km/l);

p^{lc} = porcentagem de frete-retorno vazio com a adoção da logística colaborativa igual a 0 (%).

Importa destacar que o percentual igual a zero da variável p^2 ocorre, levando-se em consideração que, em 100% das viagens de volta a composição estará carregada com fertilizantes que representa a carga máxima de retorno possível, não havendo nesse caso, frete-retorno vazios.

No tocante à análise ambiental, os valores de conversão adotados levaram em consideração a metodologia utilizada pelo programa GHG Protocol, disponibilizado pelo WRI, World Resources Institute (2023). Reconhecido e aceito internacionalmente, este protocolo é utilizado no desenvolvimento de inventários corporativos de GEE relativos à projetos e produtos. O download do programa foi realizado no dia 16 de outubro de 2023 e os fatores de conversão utilizados foram de 2,681kgCO₂/litro para o diesel e de 2,000kgCO₂/litro para o biodiesel. A análise levou em consideração ainda, uma adição de 12% de biodiesel ao óleo diesel, conforme estabelecido na Resolução nº 3 de 20 de março de 2023 do CNPE, Conselho Nacional de Política Energética (2023). Com base nos percentuais de adição do biodiesel no óleo diesel e nos fatores de emissão de CO₂ de cada combustível, o fator de emissão utilizado foi de 2,599kgCO₂/litro. Partindo-se desse ponto, foi possível calcular as emissões totais de CO₂ nos dois cenários analisados por meio das equações (6) e (7):

$$E^{C1} = \sum (T_{comb}^{C1} \times FE) \quad (6)$$

$$E^{C2} = \sum (T_{comb}^{C2} \times FE) \quad (7)$$

Onde:

E^{C1} = total de emissões de CO₂ (kgCO₂) sem a logística colaborativa (cenário atual);

T_{comb}^{C1} = total de combustível consumido pelas CVC sem a logística colaborativa (cenário atual) (l);

FE = fator de emissão utilizado (2,599kgCO₂/litro);

E^{C2} = total de emissões de CO2 (kgCO2) com a logística colaborativa (cenário ideal);
 T_{comb}^{C2} = total de combustível consumido pelas CVC com a logística colaborativa (cenário ideal)

(l). Partindo-se desse ponto, foi possível calcular a eficiência ambiental nos dois cenários estudados (atual e ideal) e a contribuição obtida com a logística colaborativa, dada pela fórmula (8):

$$EA = E^{C1} - E^{C2} \quad (8)$$

Onde:

E^{C1} = total de emissões de CO2 (kgCO2) sem a logística colaborativa (cenário atual);

E^{C2} = total de emissões de CO2 (kgCO2) com a logística colaborativa (cenário ideal);

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Em relação ao fluxo de exportação e importação, os resultados mostraram que o Porto de Paranaguá é o que apresentou maior fluxo (Tabela 2), onde a importação de fertilizantes representa 59,97% do volume exportado de soja sendo, nesse caso, o porto com maior potencial de aplicação da logística colaborativa, uma vez que, o potencial de ganho com a adoção dessa prática ocorre por meio da otimização do frete-retorno. Para Tiburcio (2012), essa otimização permite uma redução de até 57% na distância percorrida pelas composições veiculares acarretando, no entendimento de Deesrisak et al. (2019), em uma quantidade menor de combustível sendo queimado e uma diminuição das emissões de GEE na atmosfera.

Tabela 2 – Representatividade dos fluxos de exportação de soja e importação de fertilizantes por terminal de exportação

Porto	¹ Exportação Soja (t)	² Importação Fertilizantes (t)	Representatividade
Santos	514.594,69	13.801,18	2,68%
Paranaguá	2.003.155,06	1.201.221,02	59,97%
São Francisco do Sul	596.796,05	40.109,50	6,72%

Fonte: ¹MDIC, Ministério do Desenvolvimento, Indústria, Comércio e Serviços (2023a); ²MDIC, Ministério do Desenvolvimento, Indústria, Comércio e Serviços (2023b).

Em complementação aos dados dos fluxos de exportação de soja e importação de fertilizantes, foram calculados os totais de viagens necessárias para o transporte de toda a carga de soja (T_{vs}) e fertilizantes (T_{vf}), considerando-se a capacidade de carga de cada composição veicular (Tabela 3). Sendo o porto com o maior fluxo de movimentação de produtos, o Porto de Paranaguá é o que necessitaria da maior quantidade de viagens para o transporte de todo o volume movimentado, com 52.715 viagens para o transporte de toda a soja nas CVC com 7 eixos ou de 40.064 viagens nos conjuntos com 9 eixos. Já para o transporte de todo o fertilizante importado, seriam necessárias 31.612 viagens com CVC de 7 eixos ou 24.025 viagens com conjuntos de 9 eixos. Importa destacar que, os quantitativos computados na Tabela 3 não consideram a prática da logística colaborativa, somente o total de viagens necessárias de acordo com os volumes movimentados por produto em cada terminal portuário.

Os resultados apontaram ainda que as CVC com 9 eixos necessitariam de 31,58% viagens a menos para o transporte de toda a carga de soja e 31,49% para fertilizantes, quando comparadas com as CVC com 7 eixos. Devido a sua capacidade maior de carga, as CVC com 9 eixos são muito utilizadas em operações rodoviárias de longas distâncias, como no caso do transporte de grãos, das regiões produtoras até os terminais de exportação. De acordo com Widmer (2002), a utilização desse

tipo de CVC, especialmente em cargas à granel, resulta em um ganho econômico para as operações de transporte de cargas pois agrega uma parcela importante dos custos logísticos, conferindo um custo relativamente menor por tonelada transportada.

Tabela 3 – Total de viagens necessárias por composição veicular

Porto	7 eixos		9 eixos	
	Soja T_{vs}	Fertilizantes T_{vf}	Soja T_{vs}	Fertilizantes T_{vf}
Santos	13.542	364	10.292	277
Paranaguá	52.715	31.612	40.064	24.025
São Francisco do Sul	15.706	1.056	11.936	803

Fonte: dados da pesquisa.

Partindo-se da média ponderada das distâncias (trajeto médio) e dos percentuais de fretes-retorno vazios, foram feitas duas análises, sendo elas: a primeira, que considerou os conjuntos transportadores carregados tanto no trajeto de ida quanto no trajeto de volta e, a segunda, que considerou os conjuntos carregados somente no trajeto de ida até os terminais de exportação. Importa destacar que, na primeira análise, os conjuntos movimentariam um total de duas vezes a sua capacidade de carga, sendo que, a primeira vez ocorreria no trajeto de ida e a outra, no trajeto de volta. Já na análise que considerou o retorno vazio, os conjuntos movimentariam uma carga total igual a sua capacidade, quantidade essa, transportada somente no trajeto de ida até os terminais portuários de exportação.

Em continuidade, os resultados mostraram que, quando carregadas tanto no trajeto de ida quanto de volta, as CVC com 7 eixos consumiriam entre 1.103,34 e 1.190,52 litros, representando em média, 13,75% menos combustível por viagem no comparativo com a CVC com 9 eixos (Tabela 4), que consumiriam entre 1.279,24 e 1.380,32 litros. Quando da análise do retorno vazio, as CVC com 7 eixos consumiriam um total entre 858,16 e 925,96 litros, representando cerca de 15,87% menos combustível no comparativo com as CVC com 9 eixos, que consumiram entre 1.020,09 e 1.100,69 litros, resultados estes que refletem o melhor rendimento (km/l) desse tipo composição. A análise da taxa de consumo de combustível por tonelada transportada mostrou que os conjuntos de 9 eixos são 15,87% mais econômicos que os conjuntos de 7 eixos sendo que, na opção vazia, o resultado foi 10,69% menor.

Tabela 4 – Consumo total de combustível por viagem

Porto	7 eixos				9 eixos			
	¹ ICVC (l)	Tx (l/ton)	² ICVV (l)	Tx (l/ton)	¹ ICVC (l)	Tx (l/ton)	² ICVV (l)	Tx (l/ton)
Santos	1.114,54	14,67	866,87	22,82	1.292,22	12,93	1.030,44	20,61
Paranaguá	1.103,34	14,52	858,16	22,59	1.279,24	12,80	1.020,09	20,41
São Francisco do Sul	1.190,52	15,67	925,96	24,37	1.380,32	13,81	1.100,69	22,02

Legenda: ¹ICVC – trajeto de ida e volta carregado; ²ICVV – trajeto de ida carregado e volta vazio. Fonte: dados da pesquisa.

Em relação ao total de combustível consumido pelas CVC para o transporte de toda a carga anual de soja e fertilizantes (Tabela 5), foram realizadas 4 análises diferentes, sendo elas:

- Comparativo cenário atual e cenário ideal – CVC 7 eixos: a análise entre os cenários apontaram que a prática da logística colaborativa traria uma economia de 43.289,51 litros de combustível no fluxo de produtos movimentados no Porto de Santos, sendo este, o porto que possui o menor volume movimentado. Com uma movimentação maior de produtos, o Porto de Paranaguá é o

que possibilitaria a maior economia, com uma redução de 2.286.431,49 litros. Considerando o preço de mercado do diesel praticado na bomba, de R\$ 6,05 por litro (ANTT, Agência Nacional de Transporte Terrestres, 2023b), somente no comparativo entre o cenário atual e o ideal, o resultado representaria uma economia anual da ordem de R\$ 13.832.910,51 relativo à parcela do combustível no custo do transporte. Já para o Porto de São Francisco do Sul, por apresentar um fluxo maior de importação de produtos quando comparado ao Porto de Santos, os resultados indicariam uma redução de 108.382,57 litros de combustível. Somando os três terminais de exportação, os resultados mostraram que a logística colaborativa traria uma redução de 2.438.103,58 litros no consumo total de combustível, o que possibilitaria uma economia anual total de R\$ 14.750.526,66.

- Comparativo cenário atual e cenário ideal – CVC 9 eixos: os resultados mostraram que a logística colaborativa promoveria uma redução de 40.841,41 litros no consumo de combustível dos produtos movimentados no Porto de Santos, de 2.157.129,85 litros para o Porto de Paranaguá e de 102.253,34 litros para o terminal de São Francisco do Sul. Quando somado o potencial de redução dos três terminais, a logística colaborativa contribuiria com uma redução total de 2.300.224,60 litros de combustível, que representaria uma economia anual de R\$ 13.916.358,83. Importa destacar que esse resultado representa uma economia financeira na movimentação de produtos nos três terminais de exportação que resultaria uma importante fonte de vantagem de custos para as empresas transportadoras (Reis, 2023).
- Comparativo cenário atual - CVC 7 eixos e 9 eixos: os resultados mostraram que os conjuntos com 9 eixos consumiriam uma quantidade menor de combustível no comparativo com as composições de 7 eixos, chegando a 1.160.418,59 litros a menos para a movimentação dos produtos no Porto de Santos, representando uma redução de 9,68% no consumo de combustível. Por apresentar o maior fluxo de produtos, o Porto de Paranaguá é o que apresentou a maior diferença entre as CVC, sendo que o conjunto de 9 eixos consumiria cerca de 10,12% menos combustível comparado ao de 7 eixos, perfazendo uma redução total de 6.571.417,68 litros, que representaria uma economia de R\$ 39.757.076,96 relativa à parcela do combustível no custo do transporte. Segundo porto com maior fluxo de produtos, os resultados mostraram que no Porto de São Francisco do Sul seria possível obter uma economia de 1.485.509,15 litros de combustível. A análise conjunta dos três terminais apontou que os conjuntos com 9 eixos consumiriam um total de 9.217.345,42 litros a menos de combustível que as CVC com 7 eixos, que resultaria em uma economia de R\$ 55.764.939,79. Partindo-se da análise realizada por Soares e Reis-Neto (2022) que apontaram um custo financeiro total no cenário atual variando entre R\$ 952.601.963,54 e R\$ 975.669.680,94 para as composições de 7 eixos, esse resultado representaria uma redução entre 5,72% a 5,85% no custo financeiro total dos três portos de exportação. Ainda levando-se em consideração os dados apresentados pelos autores, o resultado obtido neste presente estudo resultaria em uma redução do custo entre 6,54% a 6,72 para os conjuntos com 9 eixos.
- Comparativo cenário ideal - CVC 7 eixos e 9 eixos: o comparativo entre as composições com a adoção da logística colaborativa, apontou novamente o melhor desempenho dos conjuntos com 9 eixos que, neste cenário, promoveriam uma economia de até 1.157.970,48 litros de combustível na movimentação de produtos no Porto de Santos. Com maior fluxo, no Porto de Paranaguá a redução seria de 6.442.116,04 litros que resultaria em uma economia de R\$ 38.974.802,04. Considerando os volumes de soja e fertilizantes movimentados no referido terminal portuário, o resultado representaria uma redução de R\$ 12,16 por tonelada movimentada, o equivalente a 4,48% do custo do transporte, de acordo com o Boletim Logístico de outubro de 2023 da Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB, 2023). Para o Porto de São Francisco do Sul, os resulta-

dos apontaram que a logística colaborativa promoveria uma redução de 1.479.379,92 litros de combustível que representaria uma economia de R\$ 8.950.248,52 na parcela de combustível no custo do transporte. Na análise combinada dos três portos, os resultados mostraram que, com a adoção da prática da logística colaborativa, seria possível obter uma redução de até 9.079.466,44 litros de combustível que representaria uma economia de R\$ 54.930.771,96. Importa destacar que, os dois cenários apontaram para uma economia de combustível superior a R\$ 50 milhões por ano com a utilização das composições com 9 eixos o que, combinado à quantidade menor de viagens, conferem a melhor eficiência desse tipo de conjunto transportador. Ainda que essas composições possam consumir uma quantidade maior de combustível por viagem, elas acrescentam uma parcela relativamente menor de custo de transporte ao produto (Soares; Reis-Neto, 2022).

Tabela 5 – Total de combustível consumido para o transporte de toda a carga anual de soja e fertilizantes – (valores expressos em litros)

Composição veicular	Cenário	Porto		
		Santos	Paranaguá	S. F. do Sul
7 eixos	Atual	11.984.625,13	64.962.531,33	15.279.036,57
	Ideal	11.941.335,61	62.676.099,84	15.170.654,00
9 eixos	Atual	10.824.206,54	58.391.113,65	13.793.527,42
	Ideal	10.783.365,13	56.233.983,80	13.691.274,08

Fonte: dados da pesquisa.

No tocante à eficiência ambiental, as análises realizadas indicaram que a aplicação da logística colaborativa promoveria uma redução das emissões de CO₂ para todos os portos estudados nas duas CVC analisadas, conforme detalhado nas 4 análises mostradas a seguir:

- Comparativo cenário atual e cenário ideal – CVC com 7 eixos: os resultados mostraram que, com a adoção da prática nas composições de 7 eixos, seria possível uma redução anual de 112.509,44 kgCO₂ das emissões no Porto de Santos, de 5.942.435,44 kgCO₂ para o Porto de Paranaguá e de 281.686,29 kgCO₂ para o Porto de São Francisco do Sul. Combinadamente, a logística colaborativa contribuiria com uma redução anual das emissões de 6.336.631,17 kgCO₂, resultado este que representa uma redução de 1,45kgCO₂ para cada tonelada soja e fertilizantes movimentados nos três terminais.
- Comparativo cenário atual e cenário ideal – CVC com 9 eixos: a análise dos conjuntos com 9 eixos apontou que a logística colaborativa contribuiria com uma redução anual estimada em 106.146,83 kgCO₂ para o Porto de Santos, de 5.606.380,47 kgCO₂ para o Porto de Paranaguá e, para o Porto de São Francisco do Sul em 265.756,44 kgCO₂. Quando somados os resultados dos três Portos, os resultados mostraram que a aplicação da logística colaborativa poderia contribuir com uma redução anual de 5.978.283,74 kgCO₂, perfazendo uma taxa de 1,368kgCO₂ a menos por tonelada movimentada nos três portos de exportação.
- Comparativo cenário atual - CVC 7 eixos e 9 eixos: os resultados apontaram que os conjuntos com 9 eixos emitiriam anualmente entre 9,68% a 10,11% menos CO₂ do que as CVC com 7 eixos. Considerando os volumes de soja e fertilizantes movimentados no Porto de Santos, os resultados mostraram que a utilização das CVC com 9 eixos promoveria uma redução de 3.015.927,90 kgCO₂, passando de 31.148.040,70 kgCO₂ para 28.132.112,80 kgCO₂, o que resultaria em uma

redução das emissões da ordem de 5,708 kg/CO₂ por tonelada movimentada no referido terminal portuário. Seguindo essa linha e, de acordo com os volumes movimentados no Porto de Paranaguá, com a utilização dos conjuntos supracitados seria possível emitir cerca de 17.079.114,57 kgCO₂ a menos na atmosfera, quando comparado com os conjuntos com 7 eixos, passando de 168.837.618,93 kgCO₂ das CVC com 7 eixos para 146.152.123,89 kgCO₂ dos conjuntos com 9 eixos, que resultaria em uma taxa de redução de 5,33 kgCO₂ por tonelada. Segundo porto com maior fluxo de produtos, a redução estimada para o Porto de São Francisco do Sul seria de 3.860.838,27 kgCO₂, saindo de 39.710.216,04 kgCO₂ com as CVC de 7 eixos para 35.849.377,77 kgCO₂ com os conjuntos de 9 eixos, perfazendo uma taxa de redução de 6,062 kgCO₂ por tonelada. Combinadamente, com a utilização de CVC de 9 eixos seria possível obter uma redução anual total de 23.955.880,74 kgCO₂ nas emissões, que resultaria em uma taxa de redução das emissões de 5,482 kgCO₂.

- Comparativo cenário ideal – CVC 7 eixos e 9 eixos: similar aos resultados do comparativo anterior, a análise do cenário ideal apontou que a logística colaborativa poderia promover uma redução anual das emissões de 3.009.565,29kgCO₂ no fluxo de produtos no Porto de Santos com as CVC de 9 eixos. Nos Portos de Paranaguá e São Francisco do Sul, a prática poderia reduzir em até 16.743.059,60kgCO₂ e 3.844.908,42kgCO₂, respectivamente. As taxas de redução resultantes da utilização dos conjuntos com 9 eixos seriam de 5,696 kgCO₂ por tonelada no Porto de Santos, 5,225kgCO₂/t em Paranaguá e em São Francisco do Sul poderia chegar à 6,037kgCO₂/t. Combinadamente, os conjuntos com 7 eixos emitiriam anualmente cerca de 233.359.244,50 kgCO₂ na atmosfera, sendo que, com as CVC de 9 eixos esse valor seria de 209.761.711,19 kgCO₂, perfazendo uma redução de 23.597.533,31 kgCO₂ que representa uma taxa de 5,40 kgCO₂ a menos por tonelada movimentada nos três portos de exportação.

Tabela 6 – Eficiência ambiental – (valores expressos em kgCO₂)

Composição veicular	Cenário	Porto		
		Santos	Paranaguá	S. F. do Sul
7 eixos	Atual	31.148.040,70	168.837.618,93	39.710.216,04
	Ideal	31.035.531,26	162.895.183,49	39.428.529,75
9 eixos	Atual	28.132.112,80	151.758.504,36	35.849.377,77
	Ideal	28.025.965,97	146.152.123,89	35.583.621,33

Fonte: dados da pesquisa.

Outrossim, cabe destacar que os resultados obtidos corroboram com o estudo de Soliani et al. (2019), que também apontaram uma redução da ordem de 4.480.309,03 kgCO₂ com a adoção da prática a partir dos principais municípios produtores do Estado do Mato Grosso. Em comum, tanto o estudo de Soliani et al. (2019) quanto os resultados obtidos no presente artigo, ambos foram obtidos a partir de estados produtores posicionados geograficamente na região central do Brasil, com uma distância média variando entre 1.100 km a 1.200 km até os principais terminais de exportação, localizados na região Sudeste e Sul do país. Soma-se ainda, a utilização do modal rodoviário como meio de transporte além da utilização da rodovia BR-163 como artéria (rota) principal para a movimentação das cargas (escoamento da soja e importação de fertilizantes). Em ambos os casos, o conjunto de variáveis analisadas atestam a contribuição da logística colaborativa com importante alternativa para redução das emissões de CO₂ na atmosfera.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Sendo o segundo setor que mais emite GEE, cabe ao setor de transporte desenvolver estratégias e implantar medidas que visem convergir para um transporte mais limpo e sustentável. Sob essa ótica, a logística colaborativa surge como uma alternativa para mitigar os impactos ambientais provocados pela atividade do transporte, em especial, a redução das emissões de CO₂ na atmosfera.

O comparativo entre as composições permitiu identificar a melhor eficiência dos conjuntos com 9 eixos que, além de necessitarem de 23,98% menos viagens para a movimentação de toda a carga de soja e fertilizantes, também resultariam em uma taxa de consumo de combustível por tonelada transportada, em média, 13,45% menor para os trajetos de ida e volta carregado e de 10,69% quando retornam vazias, no comparativo com os conjuntos de 7 eixos.

Em continuidade, os resultados da análise conjunta dos três terminais apontaram que a implantação da logística colaborativa traria uma redução anual no consumo total de combustível de 2.438.103,58 litros para as CVC com 7 eixos e de 2.300.224,60 litros para as CVC com 9 eixos. Foi possível identificar ainda a melhor eficiência das CVC com 9 eixos que, sem a logística colaborativa, consumiriam anualmente até 9.217.345,42 litros a menos de combustível que as CVC com 7 eixos. Já com a adoção da prática, os resultados mostraram que as composições de 9 eixos consumiriam até 9.079.466,44 litros de combustível a menos que os conjuntos com 7 eixos.

A análise da eficiência ambiental permitiu identificar que a logística colaborativa contribuiria para uma redução anual das emissões de 6.336.631,17 kgCO₂ para os conjuntos com 7 eixos e de 5.978.283,74 kgCO₂ para as composições com 9 eixos. Já no comparativo entre as composições, novamente os resultados mostraram a melhor eficiência dos conjuntos de 9 eixos, onde seria possível obter uma redução anual total, sem a logística colaborativa, de até 23.955.880,74 kgCO₂ nas emissões, e de até 23.597.533,31 kgCO₂ quando da adoção da prática.

Nessa esteira e com base nos resultados obtidos, é possível observar que a adoção da logística colaborativa promoveria significativas contribuições para a redução das emissões de CO₂, para a redução do consumo de combustíveis fósseis, em especial, aqueles utilizados pelos veículos de carga, além de minimizar os impactos ambientais provocados pelo setor do transporte, resultados estes que reforçam a adoção da prática como sendo uma importante pauta para ampliar a agenda de discussões do setor e no desenvolvimento de futuras pesquisas relacionadas ao tema.

6 AGRADECIMENTOS

O presente trabalho de pesquisa foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001. Agradecimentos também ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela bolsa de Produtividade em Pesquisa 1C e a Universidade Anhanguera-Uniderp por meio do pagamento de bolsa de estudo.

Referências

ALBUQUERQUE, D. S. **Estudo da obtenção inédita de etanol anidro da algaroba para inovadora aplicação na produção de biodiesel**. 2022. Diss. (Mestrado) – Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa. 109f. Dissertação (Mestrado em Energias Renováveis).

ALMEIDA, A. M. D.; VIEIRA, J. G. V. Logística colaborativa: um estudo com fornecedores de supermercados de pequeno e médio porte. **Revista Gestão Industrial**, v. 9, n. 3, p. 745–764, 2013.

ANTT, AGÊNCIA NACIONAL DE TRANSPORTE TERRESTRES. **Portaria SUROC nº 17, de 02 de agosto de 2023.** [S. l.: s. n.], 2023. Disponível em: https://anttlegis.antt.gov.br/action/ActionDatalegis.php?acao=abrirTextoAto&link=S&tipo=POR&numeroAto=0000017&seqAto=ATT&valorAno=2023&orgao=SUROC/ANTT/MT&cod_modulo=421&cod_menu=7782.

ANTT, AGÊNCIA NACIONAL DE TRANSPORTE TERRESTRES. **Portaria SUROC nº 20, de 28 de agosto de 2023.** [S. l.: s. n.], 2023. Disponível em: https://anttlegis.antt.gov.br/action/ActionDatalegis.php?acao=abrirTextoAto&link=S&tipo=POR&numeroAto=0000020&seqAto=000&valorAno=2023&orgao=SUROC/ANTT/MT&cod_modulo=161&cod_menu=8438.

BANN, S. J.; MALINA, R.; STAPLES, M. D.; SURESH, P.; PEARLSON, M.; TYNER, W. E.; HILEMAN, J. I.; BARRETT, S. The costs of production of alternative jet fuel: a harmonized stochastic assessment. **Bioresource Technology**, v. 227, p. 179–187, 2017.

BARTHOLOMEU, D. B.; PÉRA, T. G.; CAIXETA-FILHO, J. V. Logística sustentável: avaliação de estratégias de redução das emissões de CO₂ no transporte rodoviário de cargas. **The Journal of Transport Literature**, v. 10, n. 3, p. 15–19, 2016.

CHARABI, Y.; NASIRI, N. A.; AWADHI, T. A.; CHOUDRI, B. S.; BIMANI, A. A. GHG emissions from the transport sector in Oman: trends and potential decarbonization pathways. **Energy Strategy Reviews**, v. 32, p. 1–14, 2020.

CLEOPHAS, C.; COTTRILL, C.; EHMKE, J. F.; TIERNEY, K. Collaborative urban transportation: recent advances in theory and practice. **European Journal of Operational Research**, v. 273, n. 3, p. 801–816, 2019.

CNPE, CONSELHO NACIONAL DE POLÍTICA ENERGÉTICA. **Resolução nº 3, de 20 de março de 2023.** [S. l.: s. n.], 2023. Disponível em: <https://www.in.gov.br/web/dou/-/despacho-do-presidente-da-republica-473383252>.

CONAB, COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Boletim Logístico. Ano VII - outubro 2023.** [S. l.: s. n.], 2023. Disponível em: https://www.conab.gov.br/info-agro/analises-do-mercado-agropecuario-e-extrativista/boletim-logistico/item/download/49853_28345c71e2ee77dfc4414ec5bf7a4432.

CONTRAN, CONSELHO NACIONAL DE TRÂNSITO. **Resolução nº 211, de 12 de novembro de 2006.** [S. l.: s. n.], 2006. Disponível em: <https://www.gov.br/transportes/pt-br/assuntos/transito/conteudo-contran/resolucoes/cons211.pdf>.

DEESRISAK, N.; GARZA-REYES, J. A.; NADEEM, S. P.; KUMAR, A.; KUMAR, V.; GONZÁLEZ-ALEU, F.; VILLARREAL, B. Transport operations optimisation through lean implementation – a case study. *In: PROCEEDINGS – 3rd European IEOM Pilsen (Czech Republic) Conference.* [S. l.: s. n.], 2019.

DONG, C.; BOUTE, R.; MCKINNON, A.; VERELST, M. Investigating synchromodality from a supply chain perspective. **Transportation Research Part D: Transport and Environment**, v. 61, p. 42–57, 2018.

ELLRAM, L. M.; MURFIELD, M. L. U. Environmental Sustainability in freight Transportation: a systematic literature review and agenda for future research. **Transportation Journal**, v. 56, n. 3, p. 263–298, 2017.

ENELGREENPOWER, GRUPO. **Descarbonização: como passar das fontes fósseis às energias renováveis.** [S. l.: s. n.], 2022. Disponível em: <https://www.enelgreenpower.com/pt/learning-hub/transicao-energetica/descarbonizacao>.

EOM, J.; SCHIPPER, L.; THOMPSON, L. We keep on truckin': Trends in freight energy use and carbon emissions in 11 IEA countries. **Energy Policy**, v. 45, p. 327–341, 2012.

FERES, P. F. D. **Os biocombustíveis na matriz energética alemã: possibilidade de cooperação com o Brasil**. Brasília: FUNAG, 2010. 300p.

FERRER, M.; ARIZA, Y.; MARTÍNEZ, J.; GARIZAO, J.; PULIDO-ROJANO, A. Modelo de optimización colaborativo para la minimización de los costos variables de transporte de carga por carretera em Colombia. **Revista I+D en TIC**, Colômbia, v. 10, n. 1, p. 26–36, 2019.

FIGUEIREDO, R.; EIRAS, J. **Transporte colaborativo: Conceituação, benefícios e práticas (1ª Parte)**. Rio de Janeiro, 2007. 11p.

GHISOLFI, V.; RIBEIRO, G. M.; CHAVES, G. L. D. Uma ferramenta para planejamento da descarbonização do transporte de cargas brasileiro. *In: ANAIS eletrônicos... 33º Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes da ANPET*. Balneário Camboriú/SC: [s. n.], 2019.

HE, Z.; CHEN, P.; LIU, H.; GUO, Z. Performance measurement system and strategies for developing low-carbon logistics: A case study in China. **Journal of Cleaner Production**, v. 156, p. 395–405, 2017.

HUIZENGA, C.; PEET, K. **Transport and Climate Change: How Nationally Determined Contributions can Accelerate Transport Decarbonization**. [S. l.: s. n.], 2017. Disponível em: https://www.ndcpartnership.org/sites/default/files/NDCP_Expert_Perspectives_SLoCaT_Transport_v4.pdf.

IBERDROLA, GRUPO. **Descarbonização | Princípios e ações regulatórias da descarbonização energética que contribuem para um marco sustentável e eficiente para combater as mudanças climáticas**. [S. l.: s. n.], 2022. Disponível em: <https://www.iberdrola.com/quem-somos/energetica-do-futuro/descarbonizacao-economia-principios-aco-es-regulacao>.

IBGE, INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Produção Agrícola – Lavoura Temporária. Mato Grosso do Sul**. [S. l.: s. n.], 2022. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/ms/pesquisa/14/10193?localidade1=500540&localidade2=500660&indicador=10368&tipo=cartograma>.

IEA, INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Transport sector CO2 emissions by mode in the Sustainable Development Scenario, 2000-2030**. [S. l.: s. n.], 2022. Disponível em: <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/transport-sector-co2-emissions-by-mode-in-the-sustainable-development-scenario-2000-2030>.

ITF, INTERNATIONAL TRANSPORT FORUM. **Decarbonising Transport initiative**. [S. l.: s. n.], 2023. Disponível em: <https://www.itf-oecd.org/decarbonising-transport>.

JIMENEZ-JIMENEZ, D.; MARTÍNEZ-COSTA, M.; RODRIGUEZ, C. S. The mediating role of supply chain collaboration on the relationship between information technology and innovation. **Journal of Knowledge Management**, v. 23, n. 3, p. 548–567, 2018.

KAACK, L. H.; VAISHNAV, P.; MORGAN, M. G.; AZEVEDO, I. L.; RAI, S. Decarbonizing intraregional freight systems with a focus on modal shift. **Environmental Research Letters**, v. 13, n. 8, p. 1–30, 2018.

LAI, P.; SU, D.; TAI, H.; YANG, C. The impact of collaborative decision-market on logistics service performance for container shipping services. **Maritime Business Review**, v. 5, n. 2, p. 175–191, 2020.

LIIMATAINEN, H.; ARVIDSSON, N.; HOVI, I. B.; JENSEN, T. C.; NYKÄNEN, L. Road freight energy efficiency and CO₂ emissions in the Nordic countries. **Research in Transportation Business & Management**, v. 12, p. 11–19, 2014.

MCKINNON, A. Freight transport in a low-carbon world: Assessing opportunities for cutting emissions. **TRNews**, Washington, v. 306, p. 8–15, 2016.

MDIC, MINISTÉRIO DO DESENVOLVIMENTO, INDÚSTRIA, COMÉRCIO E SERVIÇOS. **Exportação e Importação Geral. Exportação**. [S. l.: s. n.], 2023. Disponível em: <http://comexstat.mdic.gov.br/pt/geral/99624>.

MDIC, MINISTÉRIO DO DESENVOLVIMENTO, INDÚSTRIA, COMÉRCIO E SERVIÇOS. **Exportação e Importação Geral. Importação**. [S. l.: s. n.], 2023. Disponível em: <http://comexstat.mdic.gov.br/pt/geral/99625>.

MDIC, MINISTÉRIO DO DESENVOLVIMENTO, INDÚSTRIA, COMÉRCIO E SERVIÇOS. **Nomenclatura Comum do Mercosul – NCM**. [S. l.: s. n.], 2023. Disponível em: <https://agendaweb.economia.gov.br/index.php/comercio-exterior/contatos/9-assuntos/categ-comercio-exterior/343-certificado-form-13>.

MINX, J. C.; LAMB, W. F.; ANDREW, R. M.; CANADELL, J. G.; CRIPPA, M.; DÖBBELING, N.; FORSTER, P. M.; GUIZZARDI, D.; OLIVIER, J.; PETERS, G. P.; PONGRATZ, J.; REISINGER, A.; RIGBY, M.; SAUNOIS, M.; SMITH, S. J.; SOLAZZO, E.; TIAN, H. A comprehensive and synthetic dataset for global, regional, and national greenhouse gas emissions by sector 1970–2018 with an extension to 2019. **Earth System Science Data**, v. 13, n. 11, p. 5213–5252, 2021.

PIRES, S. R. I. **Gestão da Cadeia de Suprimentos (Supply Chain Management): Conceitos, estratégias, práticas e casos**. 3. ed. São Paulo: Atlas, 2016. 368p.

REIS, T. **Vantagens competitivas de custo**. [S. l.: s. n.], 2023. Disponível em: <https://www.sunoo.com.br/artigos/vantagens-competitivas-de-custo/>.

RIBEIRO, A. O CPFR como mecanismo de integração da cadeia de suprimentos: experiências de implementação no Brasil e no mundo. **Revista Tecnológica**, v. X, n. 104, p. 78–87, 2004.

ROTAS BRASIL. **Site oficial**. [S. l.: s. n.], 2023. Disponível em: <https://rotasbrasil.com.br/>.

SEBRAE, SERVIÇO BRASILEIRO DE APOIO ÀS MICRO E PEQUENAS EMPRESAS. **O que é e como pode ser utilizado o biodiesel**. [S. l.: s. n.], 2013. Disponível em: <https://www.sebrae.com.br/sites/PortalSebrae/artigos/o-que-e-biodiesel,466d438af1c92410VgnVCM100000b272010aRCRD>.

SEO, Y. J.; DINWOODIE, J.; ROE, M. The influence of supply chain collaboration on collaborative advantage and port performance in maritime logistics. **International Journal of Logistics Research and Applications**, v. 19, n. 6, p. 562–582, 2016.

SOARES, D. G.; REIS-NETO, J. F. The impact of the cost of road transport on the price of Brazilian soybean: the case of Mato Grosso do Sul and the practice of collaborative logistics. **Research, Society and Development**, v. 11, n. 12, e155111234289, 1–16, 2022.

SOLIANI, R. D.; INNOCENTINI, M. D. M.; CARMO, M. C. Collaborative logistics and eco-efficiency indicators: an analysis of soy and fertilizer transportation in the ports of Santos and Paranaguá. **Independent Journal of Management & Production**, v. 11, n. 5, p. 1624–1647, 2020.

SOLIANI, R. D.; INNOCENTINI, M. D. M.; CARMO, M. C. Redução das emissões de CO₂ por meio da logística colaborativa: uma análise do transporte de soja e fertilizantes nos portos de Santos e Paranaguá. **Revista de Administração e Negócios da Amazônia – RARA**, v. 11, n. 4, p. 106–130, 2019.

STEADIESEIFI, M.; DELLAERT, N. P.; NUIJTEN, W.; VAN WOENSEL, T.; RAOUFI, R. Multimodal freight transportation planning: a literature review. **European Journal of Operational Research**, v. 233, n. 1, p. 1–15, 2014.

SUREEYATANAPAS, P.; POOPHIUKHOK, P.; PATHUMNAKUL, S. Green initiatives for logistics service providers: An investigation of antecedent factors and the contributions to corporate goals. **Journal of Cleaner Production**, v. 191, p. 1–14, 2018.

TACLA, D. **Estudo de transporte colaborativo de cargas de grande volume, com aplicação em caso de soja e fertilizantes**. 2003. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (USP), São Paulo. 352f. Tese (Doutorado em Engenharia).

TETER, J.; CAZZOLA, P.; GUL, T.; MULHOLLAND, E.; LE FEUVRE, P.; BENNETT, S.; HUGUES, P.; LAGARDE, Z.; KRAAYVANGER, V.; BRYANT, T.; SCHEFFER, S.; BIANCO, E.; MCDONALD, Z.; MARONEY, E. **The Future of Trucks: Implications for energy and the environment**. 2. ed. Paris: IEA, 2017. 164p.

TIBURCIO, D. M. **Técnicas da pesquisa operacional na abordagem do problema de roteamento no transporte de funcionários de empresas**. 2012. Diss. (Mestrado) – Universidade Federal do Paraná (UFPR), Curitiba. 86f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção).

UNITED NATIONS. **Sustainable Transport, Sustainable Development. Interagency Report for Second Global Sustainable Transport Conference**. [S. l.: s. n.], 2021. Disponível em: https://sdgs.un.org/sites/default/files/2021-10/Transportation%20Report%202021_FullReport_Digital.pdf.

VERMA, S.; KAUSHAL, R. K. A game theoretic approach for global cooperation in climate control. **Journal of Environmental Engineering and Studies**, v. 1, n. 3, p. 1–16, 2016.

WIDMER, J. A. Compatibilidade de tráfego de bitrens de 25m com a infra-estrutura viária brasileira. *In*: ANAIS eletrônicos... 1º Colloquium de Implementos Rodoviários da SAE-Brasil. Caxias do Sul/RS: [s. n.], 2002.

WRI, WORLD RESOURCES INSTITUTE. **GHG Protocol**. [S. l.: s. n.], 2023. Disponível em: <https://ghgprotocol.org/sites/default/files/2022-12/GHG%20Protocol%20-%20Agricultura%20-%20Brasil%20v3.10.xlsx>.

ZALUSKI, P. R. S.; RODRIGUEZ, C. M. T.; CAMPOS, L. M. S. Avaliação da ecoeficiência em sistemas logísticos: visão geral da literatura. *In*: ANAIS eletrônicos... XXXIX Encontro Nacional de Engenharia de Produção (ENEGEP). Santos/SP: [s. n.], 2019.