

6

Descarbonização no transporte de cargas: alteração estrutural da matriz logística *versus* ganhos de eficiência nos modos de transporte

Felipe Borim Villen
Tiago Toledo Ferreira
Bernardo Furtado Nunes
Edson José Dalto
Marco Aurélio Cabral Pinto
Paulo Marcelo Machado Costa*

* Respectivamente, superintendente da Área de Infraestrutura (AINFRA) do BNDES; e chefe, economista e engenheiros do Departamento de Transportes e Logística da AINFRA.

INTRODUÇÃO

O transporte de cargas em longa distância no Brasil, realizado predominantemente por caminhões, é responsável por importante parcela de emissão de poluentes e gases de efeito estufa. De acordo com o Balanço Energético de 2023 (EPE, 2023), o setor de transporte representa 50% do total de dióxido de carbono (CO₂) emitido no Brasil entre os diversos usos de energia.¹ O transporte rodoviário apresenta elevado consumo de *diesel*, gerando mais emissões por tonelada de carga transportada do que outros sistemas mais eficientes, como o ferroviário, o aquaviário e o dutoviário. Nesse sentido, uma questão que se coloca é saber quais alternativas de investimento melhor contribuiriam no esforço de descarbonização e aumento da eficiência energética dos transportes: uma alteração estrutural na matriz de transporte, com a transferência de cargas da rodovia para outros modos mais eficientes, ou um aprimoramento nas tecnologias intrínsecas a cada modo de transporte? Este artigo advoga em favor da primeira alternativa, comparando o impacto marginal no ganho de cada solução e mostrando quanto uma matriz de cargas mais equilibrada pode afetar o aumento da eficiência e a redução de emissões, *vis-à-vis* algumas alternativas de aprimoramento intrínsecas a cada meio de transporte. Naturalmente, não se trata de escolha entre alternativas excludentes, sendo o esforço por ganhos em eficiência e redução de emissão em cada meio de transporte uma meta a ser perseguida, porém com contribuição inferior quando comparado ao potencial de migração de carga da rodovia para modos mais eficientes.

O GHG Protocol² propõe que os esforços de mitigação de emissões para atingimento das metas estabelecidas no Acordo de Paris em um nível empresarial devem iniciar pelo mapeamento das atividades econômicas em que essas emissões acontecem. Para tanto, propõe a segmentação das atividades empresariais nos escopos 1, 2 e 3. O escopo 1 engloba emissões provenientes diretamente do processo produtivo da empresa, com utilização de recursos

1 Os usos de energia correspondem a 23,2% das emissões de gases de efeito estufa (BRASIL, 2022). As demais fontes são processos industriais e uso dos produtos (6,1%), agropecuária (28,5%), mudança do uso da terra e florestas (38,0%) e resíduos (4,2%).

2 GHG Protocol, ou Protocolo de Gases com Efeito Estufa, é um conjunto de padrões de caráter global para que empresas e organizações mensurem e gerenciem emissões de gases de efeito estufa.

do próprio negócio. Já o escopo 2 refere-se a emissões associadas ao consumo de energia adquirida pela companhia, enquanto o escopo 3 abrange emissões indiretas, que acontecem ao longo da cadeia de valor, contemplando clientes e fornecedores da empresa, incluindo o transporte das mercadorias. As oportunidades de ganho no escopo 3 podem chegar a 5,5 vezes os esforços realizados nos dois primeiros escopos.

No entanto, as soluções usualmente adotadas por organizações em relação ao transporte próprio ou de terceiros restringem-se a ganhos de eficiência no uso do caminhão, sem considerar a possibilidade de migração de suas cargas para sistemas de transporte mais eficientes, como o ferroviário ou o aquaviário, o que pode estar subestimando os ganhos potenciais de redução de emissões. Porém, nem sempre essa mudança é possível ou economicamente viável. Grande parte do esforço pela mudança na matriz de transportes provém da iniciativa pública de planejamento e incentivo aos operadores para que essa transformação aconteça.

Tendo isso em mente, este artigo apresenta um exercício de estimação do impacto das emissões do transporte de carga no Brasil se houvesse uma mudança na matriz de transporte do modo rodoviário para outros de menor emissão. Além desta introdução, na segunda seção, apresentam-se as emissões médias por modo de transporte, enquanto a terceira seção elenca algumas alternativas de redução das emissões. Já a quarta seção traz o panorama atual da matriz de transporte brasileira, um cenário para 2035 com a demanda total por transporte de diferentes tipos de carga, além de uma reconfiguração da matriz de transporte para atender essa demanda. Por fim, são apresentadas as conclusões.

CONSUMO RELATIVO E EMISSÃO DOS MODOS DE TRANSPORTE DE CARGA

Uma maneira muito direta de observar a eficiência relativa dos modos de transporte e o nível de emissões consiste em comparar o consumo médio e o nível de emissão por TKU³ de carga transportada. Para esse propósito, o conjunto de cargas

3 TKU é a sigla para “tonelada quilômetro útil”, que representa o somatório da multiplicação de toneladas de carga efetivamente transportada pela distância de viagem de cada frete.

pode ser subdividido em quatro grandes categorias: carga geral, granéis minerais, granéis agrícolas e granéis líquidos. Na categoria de carga geral, de acordo com os critérios da Fundação Dom Cabral (FDC), enquadram-se os alimentos e bebidas processadas, manufaturados e outros. Em granéis minerais estão o minério de ferro, outros minerais e cimento. Em granéis agrícolas estão compreendidos principalmente soja e milho em grãos e farelo de soja. Granéis líquidos englobam combustíveis líquidos, petroquímicos e químicos (Resende; Cesar, 2019e). A Tabela 1 resume essas informações para os diferentes modos de transporte e tipos de cargas.

Tabela 1. Emissões de CO₂ e consumo de combustível por modo de transporte e tipo de carga

MODO DE TRANSPORTE	EMISSIONES (KG CO ₂ /MIL TKU)				FATOR DE EMISSÃO (G CO ₂ /L)	CONSUMO MÉDIO (L/MIL TKU)			
	Granel mineral	Granel agrícola	Granel líquido	Carga geral		Granel mineral	Granel agrícola	Granel líquido	Carga geral
Rodoviário	59,2	37,3	57,2	54,4	2,37	25,0	15,7	24,1	23,0
Ferroviário	8,7	16,6	7,2	23,8	2,37	3,7	7,0	3,0	10,0
Cabotagem	4,4	4,4	4,8	9,1	2,95	1,5	1,5	1,6	3,1
Hidroviário	2,7	2,8	4,8	7,4	2,95	0,9	0,9	1,6	2,5

Fonte: Elaboração própria, com base em dados de EPL e Iema (2021).

Nota: Considerou-se, para os modos rodoviário e ferroviário, o uso exclusivo de *diesel* B10; e para o aquaviário, a mistura de 67% de óleo combustível e 33% de *diesel* B0. Os fatores de emissão são 2,37 g de CO₂/l para o *diesel* B10 e 2,95 para a mistura considerada.

A metodologia proposta por EPL e Iema (2021) é bastante detalhada e criteriosa, e as emissões são estabelecidas em faixas de valores. A Tabela 1 reflete uma média simples do intervalo de valores das emissões para cada modo de transporte e tipo de carga transportada. O cálculo do consumo é resultado de uma relação entre as emissões e o fator de emissão.

Os diferentes valores de emissão e consumo médio de combustível para cada tipo de carga são explicados principalmente pelo fato de o equipamento de transporte variar segundo o tipo de carga transportada. Por exemplo, caminhões se distinguem de acordo com a capacidade de carga que são capazes de transportar (leves, pesados, bitrem etc.), e cada um é mais utilizado para determinado tipo de carga, afetando o consumo e as emissões médias.

O mesmo raciocínio vale para o tamanho de uma composição ferroviária ou para o número de balsas hidroviárias.

É fácil observar na Tabela 1 que, em ordem crescente de eficiência e decrescente de emissões, o modo rodoviário é o menos eficiente e o maior emissor por TKU transportada, seguido pelo ferroviário, pela cabotagem e, em melhores condições, pelo hidroviário, com menor emissão relativa e melhor desempenho.

Além disso, a Tabela 1 revela que o transporte rodoviário emite mais do que o dobro do ferroviário por TKU no transporte de carga geral e cerca de sete vezes mais no transporte mineral, em que a inserção da ferrovia é consideravelmente maior. Comparado à cabotagem e ao hidroviário, o transporte rodoviário emite cerca de 6 a 13 vezes mais e de 7 a 22 vezes mais, respectivamente.

Pode-se concluir, a partir dessa comparação, como a migração de cargas da rodovia para modos mais eficientes e, conseqüentemente, menos emissores poderia contribuir substancialmente para o esforço de descarbonização do transporte de cargas. Seria necessário um esforço muito grande de eficiência, ou uma mudança de paradigma tecnológico (como eletrificação da frota), para que o transporte rodoviário atingisse os padrões de emissão dos demais modos.

ALTERNATIVAS PARA REDUÇÃO DE EMISSÕES DE CO₂ NO SEGMENTO DE TRANSPORTES

A literatura enumera um conjunto extenso de alternativas para redução de emissões, a maioria com ênfase em tecnologia de motores e fontes de energia. Branco e outros (2023) apresentam algumas delas:

- » aumento do uso de veículos elétricos ou híbridos;
- » ampliação da participação dos biocombustíveis de baixa emissão líquida de carbono;

- » redução do consumo energético dos veículos de transporte (ganhos de eficiência);
- » redução do congestionamento e da demanda por viagens;
- » ampliação e melhor integração da infraestrutura intermodal de transporte (diminuindo a quilometragem que a carga viaja pelo modo rodoviário e ampliando-a nos modos menos emissores);
- » desenvolvimento e disseminação do uso de sistemas inteligentes de transporte para maximizar a utilização da capacidade de carga dos veículos por meio de uma melhor coordenação entre as cargas que devem ser transportadas e o tráfego dos veículos;
- » disseminação de sistemas que permitem maior compartilhamento de informações entre usuários e fornecedores de serviços de transporte;
- » campanhas para disseminação de medidas comportamentais e tecnologias de assistência a condutores para estimular a condução de veículos de forma a minimizar o consumo de combustíveis (*ecodriving*);
- » maior uso de telemetria e equipamentos de navegação por GPS para ganhos de eficiência e redução da quilometragem e do tempo de circulação dos veículos;
- » criação de incentivos e subsídios baseados em eficiência e emissões de CO₂;
- » mensuração da emissão de CO₂ das operações de transporte e ampla divulgação dos dados por meio de *benchmarking* para estimular a migração para modos com menor impacto ambiental;
- » construção de corredores de transporte eficientes para fluxos de longa distância e exportação;
- » melhoria da logística de entrega de cargas nos grandes centros urbanos (*last mile logistics*); e
- » fomento a pesquisa e inovação tecnológica voltadas para o desenvolvimento de sistemas logísticos e de transporte sustentáveis.

Entre as alternativas apresentadas, Branco e outros (2023) analisam um conjunto restrito de soluções, apontadas como as mais promissoras para o Brasil na redução de emissões de CO₂, a serem implantadas em um horizonte de dez anos, resumidas no Quadro 1. Para esse conjunto são estimadas a redução

marginal, medida em porcentagem por TKU transportada, e a redução potencial, medida em milhões de toneladas, avaliadas para um agrupamento restrito, mas factível, da frota considerada, no horizonte de dez anos.

Quadro 1. Alternativas para redução da emissão de CO₂ e potencial de mitigação

REDUÇÃO ESTIMADA NA EMISSÃO DE CO ₂			
Ações	Ganho marginal (%/TKU)	Ganho potencial (milhões de t)	Racional para redução
1) Ampliação do transporte intermodal de cargas	59 a 95	22,0	Diminuição da quilometragem transportada pelo modo rodoviário e ampliação pelos modos menos emissores
2) Estímulo ao uso de sistemas inteligentes de transporte para aumentar a ocupação da capacidade de carga dos veículos	8 a 9	8,6	Ganhos de escala no transporte, reduzindo o total de veículos necessários
3) Aumento da frota de caminhões com tecnologias de baixo consumo de combustível	30	7,5	Melhoria da <i>performance</i> energética dos caminhões, principalmente com tecnologia de motores e combustíveis
4) Aumento do transporte de cargas em veículos de maior capacidade	14	7,5	Substituição de caminhões de menor por de maior capacidade nas rotas inter-regionais
5) Aumento do uso de combustíveis alternativos com menor emissão de CO ₂	41	6,4	Substituição do <i>diesel</i> pelo biometano em uma abordagem <i>well-to-wheel</i>
6) Diversas medidas para redução da emissão de CO ₂ no transporte ferroviário	41	0,1	Melhora da <i>performance</i> do material rodante; implantação de treinamento e sistemas de <i>ecodriving</i> para os maquinistas; uso de sistemas para controle de tráfego e melhoria das operações de manobras dos trens

Fonte: Elaboração própria, com base em dados de Branco e outros (2023).

Para a primeira ação, o ganho marginal é estimado a partir das informações da Tabela 1, ou seja, cada TKU de carga transferida da rodovia para modos eficientes representa uma redução entre 55% e 95% de emissões. O ganho potencial total decorre da análise da transferência de cargas entre os diversos modos de transporte e tomou como base os investimentos em um *pipeline* de projetos apresentados no Plano Nacional de Logística – PNL 2025 (EPL, 2018). Primeiramente, estimou-se

a matriz de cargas para as condições do ano-base (2015), segmentada por tipo de carga e modo de transporte, e projetou-se a matriz para o ano de 2025, considerando o crescimento da TKU e a implantação dos projetos propostos. Na sequência, avaliou-se a emissão total para a distribuição modal do ano-base com a TKU de 2025 e comparou-se a emissão total de 2025 com a divisão modal de 2025. Nas projeções do PNL, essa redução é avaliada em 22 milhões de toneladas.

Resumidamente, a ação 2 consiste no aumento da ocupação média dos caminhões utilizados no transporte inter-regional de carga de 50% para 55% em três diferentes categorias de veículos. A ação 3 considera uma melhora na *performance* energética de 30% para os caminhões, utilizando uma taxa de renovação de frota de 15%. A ação 4 propõe a substituição de caminhões de menor capacidade pelos de maior capacidade de carga nas rotas inter-regionais, na proporção de 20%. Para a ação 5, considera-se a substituição do *diesel* pelo biometano até um limite de 30% da frota. A sexta e última ação avaliada considera a redução das emissões no sistema ferroviário de cargas, que compreende um amplo conjunto de medidas adotadas na Europa, como melhora da *performance* do material rodante, implantação de treinamento e sistemas de *ecodriving* para os maquinistas, uso de sistemas para controle de tráfego e melhoria das operações de manobras dos trens.

Pela análise do Quadro 1, conclui-se que tanto o ganho marginal quanto o potencial obtido pela transferência de carga da rodovia para modos eficientes proporcionam redução de emissão de CO₂ substancialmente superior a qualquer medida de mitigação intrínseca adotada individualmente nos sistemas de transporte.

ANÁLISE DO POTENCIAL E DOS IMPACTOS DE MIGRAÇÃO DE CARGAS DA RODOVIA PARA MODOS MAIS EFICIENTES DE TRANSPORTE

Nesta seção apresentam-se características da matriz brasileira de transporte de carga – particularmente sua predominância rodoviária *vis-à-vis* outros países e a própria infraestrutura existente –, além de um cenário otimizado para 2035 e o potencial de redução de emissões contido nele.

Matriz de transporte nacional e cenário para 2035

A matriz de transportes brasileira, como é de amplo conhecimento, apresenta um desequilíbrio em favor do transporte rodoviário. Tal constatação advém da comparação com outros países ou regiões de grande extensão territorial, bem como da análise da possibilidade da migração de carga da rodovia para outros modos de transporte mais econômicos e menos agressivos ao ambiente.

A comparação da matriz logística brasileira com a de outras regiões de grande extensão territorial é mostrada na Tabela 2.

Tabela 2. Matriz de transporte comparando países de grande extensão territorial (%)*

PAÍS	MODO DE TRANSPORTE			
	Rodoviário	Ferroviário	Aquaviário	Dutoviário
Brasil	57	24	17	3
Argentina	88	4	8	0
Índia	79	21	0	0
México	75	25	0	0
União Europeia	65	14	18	3
Japão	51	5	44	0
Estados Unidos	42	35	10	12
China	35	14	48	3
Austrália	28	58	14	0
Canadá	27	45	6	22
Rússia	6	61	2	31

Fonte: OECD ([2024]), Eurostat (2024), Resende e Cesar (2019e) e ITF (2020). **

Notas: * Os valores percentuais são obtidos a partir da carga transportada em toneladas multiplicada pela distância de transporte dentro de cada modo. No caso brasileiro, além da FDC (Resende; Cesar, 2019e), há outras duas referências de matriz de transportes: o PNL 2035 e o Instituto Ilos. Para o PNL, a proporção do rodoviário é de 66%, e para o Ilos, 62% – ambos superiores aos 57% propostos pela FDC. ** A maior parte das informações foi extraída da base de dados da OECD para o ano de 2018. São exceções: todos os valores para Índia e aquaviário para Austrália, que são da mesma fonte, mas relativos ao ano de 2017; os dados do Canadá, que também são da mesma fonte, porém o dutoviário é de 2015 e o aquaviário é de 2013; os dados da União Europeia, extraídos da Eurostat, referentes a 2021, último ano que registra valores para todos os modos e primeiro ano estatístico pós-Brexit; os números do Brasil, cuja fonte é Resende e Cesar (2019e); e os valores da Argentina, cuja fonte é o ITF (2020).

Na distribuição percentual entre os diferentes modos de transporte, a Rússia é, de longe, a que concentra seu transporte nos modos mais eficientes, dedicando apenas 6% para o rodoviário. Também é o país que proporcionalmente aloca maior carga para as ferrovias (61%) e dutovias (31%), em razão das longas distâncias e elevada presença de *commodities* na matriz de cargas, como carvão, petróleo e gás natural. Também merece destaque o caso da Austrália, que conta com uma extensão de trilhos um pouco maior que a do Brasil (37 mil km) e forte presença de *commodities* transportadas em longas distâncias.

Para o caso brasileiro, avaliando-se a possibilidade de migração de carga para sistemas mais eficientes, cabe inicialmente analisar o perfil dos produtos movimentados internamente. A Tabela 3 revela, para cada tipo de produto, o volume total transportado em toneladas úteis (TU) e sua participação relativa, o total em TKU e sua participação relativa, além da distância média de transporte.

Tabela 3. Tipologia de produtos, TU e TKU transportados e distância média de transporte

TIPO DE CARGA	TU (BILHÕES DE T)	TU (%)	TKU (TRILHÕES DE T X KM)	TKU (%)	DISTÂNCIA MÉDIA (KM)
Carga geral	0,671	36,5	0,747	45,2	1.113,3
Granéis minerais	0,704	38,3	0,488	29,6	693,2
Granéis agrícolas	0,192	10,4	0,196	11,9	1.020,8
Granéis líquidos	0,272	14,8	0,220	13,3	808,8
Total	1,839	100,0	1,651	100,0	897,8*

Fonte: Elaboração própria, com base em dados de Resende e Cesar (2019e).

Nota: *Média ponderada da distância de transporte pelo % em TU.

Os granéis minerais, líquidos e agrícolas são predominantemente *commodities* voltadas à exportação, e a elevada participação desse grupo no conjunto de mercadorias transportadas internamente em longas extensões reflete a distância entre as áreas produtoras e o litoral do país. Assim, tais cargas requerem fretes reduzidos para serem competitivas no mercado global; logo, elas buscam modos de transporte com menores custos unitários, conforme aponta a Tabela 4.

Tabela 4. Divisão modal para cada tipo de carga

TIPO DE CARGA	RODOVIÁRIO (% TKU)	FERROVIÁRIO (% TKU)	AQUAVIÁRIO (% TKU)	DUTOVIÁRIO (% TKU)	TOTAL TKU (BILHÕES)
Carga geral	82,4	4,6	13,0	0,0	747,11
Granéis minerais	15,0	62,6	17,0	5,4	488,12
Granéis agrícolas	65,0	19,3	15,7	0,0	196,44
Granéis líquidos	54,0	4,5	33,7	7,8	220,47
Total	56,6	23,5	17,3	2,6	1.652,14

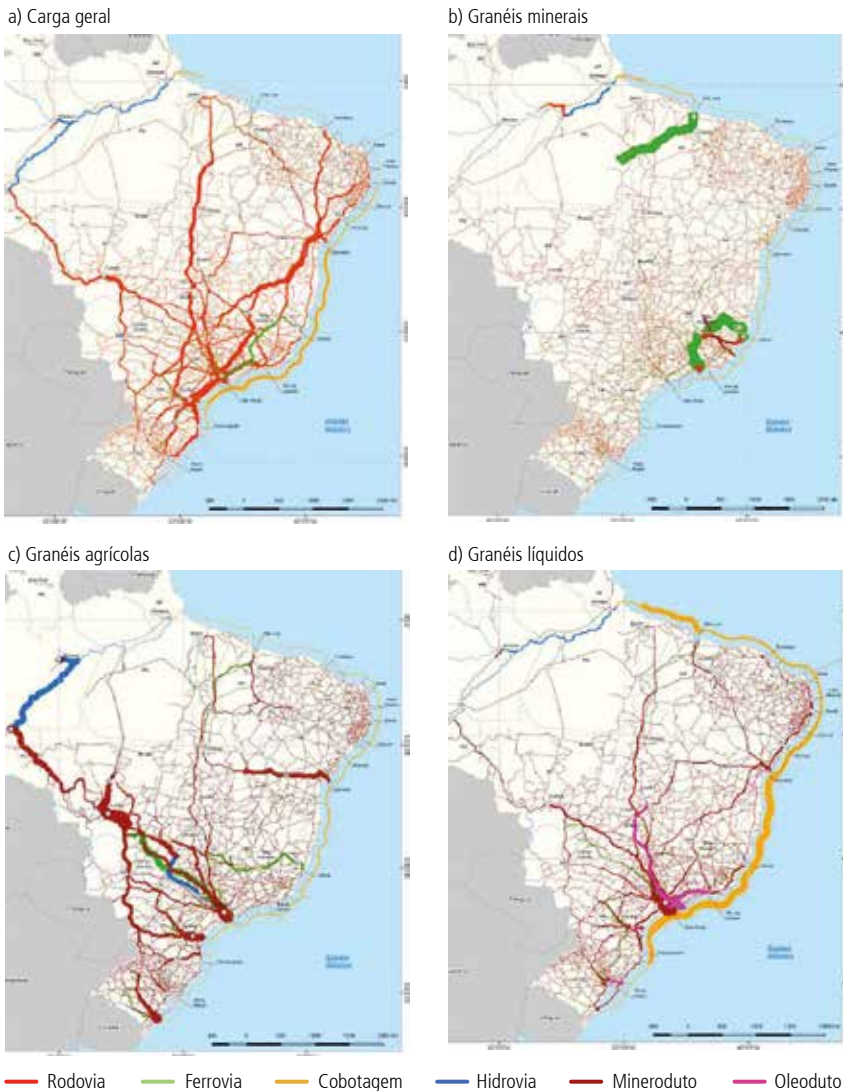
Fonte: Elaboração própria, com base em dados de Resende e Cesar (2019e).

Como se observa na Tabela 4, mais de 80% da carga geral viaja pelas rodovias, com 13% no transporte aquaviário, sendo muito incipiente a inserção da carga geral na ferrovia. Já os granéis minerais concentram-se na ferrovia, mas suas participações rodoviária e aquaviária não são desprezíveis, tendo também alguma presença no transporte dutoviário (principalmente minério de ferro). Granéis agrícolas são mais presentes na rodovia, com 65%, porém com participação relevante em ferrovia (19,3%) e sistemas aquaviários (15,7%). Finalmente, os granéis líquidos viajam predominantemente na rodovia e em modos aquaviários, tendo alguma inserção em dutos e uma menor na ferrovia.

A análise comparada entre as tabelas 3 e 4 leva à conclusão de que existe um potencial razoável de migração de cargas para sistemas de menores custos unitários, particularmente para as mercadorias que viajam longas distâncias e para as *commodities* que podem ser consideradas cativas de modos mais eficientes. Também deve ser considerado que muitas fontes de matérias-primas são inexploradas ou subexploradas em razão da ausência de uma linha ferroviária mais próxima, como se pode constatar pelas diversas solicitações de autorização de construção de linhas férreas para acesso a jazidas minerais pelo interior do país (ANTT, [2024]), o que foi viabilizado pela promulgação do novo marco regulatório ferroviário – Lei 14.273, de 23 de dezembro de 2021 (Brasil, 2021). Esse é também o caso das jazidas da Bahia Mineração (Bamin), na região de Caetité/BA (Revista Ferroviária, 2021), que estão subexploradas devido à obra ainda não concluída do trecho 1 da Ferrovia de Integração Oeste-Leste (Fiol) e do Porto Sul em Ilhéus/BA.

Explorando agora a possibilidade de migração de cargas da rodovia para modos eficientes de transporte, o conjunto de mapas da Figura 1 mostra a distribuição espacial das rotas por tipologia de carga no Brasil e ajuda a constatar visualmente os deslocamentos das mercadorias pelos diferentes modos de transporte, as distâncias de viagem e as principais rotas utilizadas.

Figura 1. Alocação dos diversos tipos de carga na rede de transportes



Fonte: Resende e Cesar (2019a, p. 26, 2019b, p. 26, 2019c, p. 26, 2019d, p. 26).

Nota: A alocação apresentada reflete um mapeamento efetuado para o ano de 2015.

A transferência da carga geral da rodovia para a ferrovia acarretaria um ganho expressivo no esforço de descarbonização dos transportes, dado que esse segmento representa 37% da TKU brasileira, e há uma sobreposição razoável das rotas rodoviárias principais com a malha ferroviária existente no país. Para tornar essa mudança viável, seriam necessárias a recapacitação da malha e a construção de alguns trechos faltantes, além da proposição de um serviço ferroviário que oferecesse aumento da velocidade de transporte e confiabilidade nos prazos de entrega. A carga industrial exige maior previsibilidade e menores estoques ao longo da cadeia de suprimentos. Nesse sentido, deve haver uma programação de trens ágeis e menores, com agenda regular de paradas em estações e pátios de transbordo (Dalto; Castro; Passos, 2023).

Outra oportunidade expressiva encontra-se no incremento do transporte de cabotagem, que poderia absorver parte considerável da carga rodoviária de longa distância entre as cidades mais próximas da costa, sendo necessário melhorar o serviço com mais navios e maior frequência de escala nos portos, incluindo transporte porta a porta com perna rodoviária, além de fretes mais competitivos.

Acredita-se que haja também um potencial muito grande de migração da carga agrícola rodoviária (cerca de 8% da TKU total) para o modo ferroviário, por ser sua vocação natural (grandes volumes e longas distâncias). Além disso, grande parcela dos investimentos em realização nas ferrovias visa capturar esse tipo de carga prioritariamente. Destacam-se nesse sentido a expansão de capacidade do conjunto Malha Paulista e Malha Norte da Rumo e a expansão desta última até Lucas do Rio Verde/MT; a construção da Fiol, especialmente em seu segundo trecho de Caetité/BA até Barreiras/BA; e a construção da Ferrovia de Integração Centro-Oeste (Fico), entre Água Boa/MT e Mara Rosa/GO em seu primeiro trecho, onde se conecta com a Ferrovia Norte-Sul.

Considerando essas oportunidades de migração de cargas para modos de transporte eficientes, uma abordagem que pode ser empregada é aquela adotada pela FDC (Resende; Cesar, 2019e). Ela projeta o crescimento de cada tipo de carga do cenário-base de 2015 para 2035, adiciona os novos investimentos previstos na infraestrutura de transportes e faz a realocação das futuras cargas na infraestrutura disponível, de acordo com os novos custos unitários de deslocamento e restrições de capacidade da infraestrutura projetada.

Assim, a nova infraestrutura reflete um cenário otimizado, que, de acordo com Resende e Cesar (2019e, p. 10), “simula um portfólio ampliado com projetos selecionados para romper gargalos e inserir ligações faltantes na rede até 2035”. A nova realocação dos fluxos de carga na infraestrutura projetada para 2035 proporciona uma nova configuração para a matriz logística, conforme mostrado na Tabela 5.

A nova matriz de transportes projeta uma participação agregada do modo rodoviário em 47,7%, do ferroviário em 36,7%, do aquaviário em 12,6% e do dutoviário em 3,0%. Isso representa uma redução de 8,9 pontos percentuais (p.p.) de participação do transporte rodoviário (menos eficiente) em benefício dos demais modos (considerados mais eficientes). O que mais cresce em participação é o ferroviário, com acréscimo de 13,2 p.p. O dutoviário ganha participação marginal em 0,4 p.p., porém o aquaviário perde 4,7 p.p. na nova configuração. A nova matriz pode ser considerada equilibrada, pois apresenta distribuição semelhante entre a TKU rodoviária e a dos demais modos eficientes, com ligeira vantagem para estes, em 52,3% contra 47,7%.

Analisando-se a segmentação por tipologia de cargas, as maiores alterações relativas são registradas em grânéis agrícolas, que perdem participação nas rodovias em 24,7 p.p., migrando principalmente para ferrovias, que ganham expressivos 31,5 p.p. de participação. Grânéis líquidos perdem 12,6 p.p. de participação rodoviária e 17,2 p.p. do modo hidroviário, migrando fortemente para o ferroviário, que ganha 27,0 p.p. de inserção nesse tipo de carga. Dutoviário também ganha participação no granel líquido, porém sua inserção é baixa nesse modo de transporte. Carga geral e grânéis minerais sofrem pouca alteração na transição intermodal, porém migram principalmente para ferrovias. Para os grânéis minerais, a migração segue uma lógica natural, já que a ferrovia é um modo cativo para esse tipo de carga. Quanto à carga geral, embora a transferência percentual seja tímida (redução de 2,7% na rodovia e acréscimo de 4% na ferrovia), a TKU da carga geral representa 43% da totalidade, a maior entre os tipos de carga. Além disso, poderia haver uma política pública de maior incentivo à migração desse tipo de carga da rodovia para a ferrovia, dado que já existe uma sobreposição razoável entre as maiores rotas rodoviárias e as ferrovias existentes e projetadas; contudo, essa diretriz não é inserida no modelo de simulação.

Tabela 5. Matriz logística projetada para 2035 segmentada por tipo de carga e modo de transporte

TIPO DE CARGA	TOTAL TKU (BILHÕES T X KM)		RODOVIÁRIO (%)		FERROVIÁRIO (%)		AQUAVIÁRIO (%)		DUTOVIÁRIO (%)	
	2015	2035	2015	2035	2015	2035	2015	2035	2015	2035
				Δ%		Δ%		Δ%		Δ%
Carga geral	747,11	1.034,88	82,4	79,7	4,6	8,6	13,0	11,7	0,0	0,0
				-2,7		4,0		-1,3		0,0
Granéis minerais	488,12	765,11	15,0	9,7	62,6	71,5	17,0	13,6	5,4	5,2
				-5,3		8,9		-3,4		-0,2
Granéis agrícolas	196,44	286,53	65,0	40,3	19,3	50,8	15,7	8,9	0,0	0,0
				-24,7		31,5		-6,8		0,0
Granéis líquidos	220,74	303,81	54,0	41,4	4,5	31,5	33,7	16,5	7,8	10,5
				-12,6		27,0		-17,2		2,7
Total	1.652,41	2.390,33	56,6	47,7	23,5	36,7	17,3	12,6	2,6	3,0
				-8,9		13,2		-4,7		0,4

Fonte: Elaboração própria, com base em dados de Resende e Cesar (2019e).

Emissões evitadas como resultado da matriz de transporte mais equilibrada

Uma vez determinado um cenário para a demanda por transporte de carga em 2035, o cálculo das emissões evitadas pode ser feito mediante uma comparação com o ano-base de 2015. Inicialmente, é necessário construir um cenário-base de comparação, ou seja, o total da TKU projetado para o ano de 2035, com a reprodução da distribuição modal de 2015. Logo, o cenário-base representa uma situação hipotética do aumento da TKU em decorrência do crescimento econômico, sem que haja alteração na matriz de transportes. A seguir, projeta-se o total de TKU para 2035 com a repartição modal estimada por Resende e Cesar (2019e), denominado cenário projetado. A comparação entre os dois cenários reflete as diferenças na redistribuição das cargas pelos modos de transporte, apresentadas na Tabela 6.

O próximo passo consiste na determinação das emissões de CO₂ por modo de transporte e tipo de carga. Essa estimativa foi apresentada na Tabela 1, porém faltam algumas adaptações para que se possa traduzir diretamente a relação entre TKU e emissões. Inicialmente, a divisão modal trata agregadamente o transporte aquaviário, enquanto a Tabela 1 segmenta as emissões entre cabotagem e hidroviário. De forma simplificada, considerou-se que, entre os modos aquaviários, as cargas minerais e agrícolas viajam predominantemente por hidrovias; os grânéis líquidos, por cabotagem; e a carga geral se distribui igualmente entre hidrovias e cabotagem. Nesse sentido, considera-se, para as cargas minerais e agrícolas, apenas a emissão hidroviária. Para líquidos, considera-se a emissão da cabotagem; e, para a carga geral, a média simples entre as emissões hidroviária e da cabotagem. A Tabela 1 também omite as emissões do modo dutoviário. Considerou-se, para esse modo, o mesmo valor de 3,9 kg de CO₂/mil TKU⁴ para todos os tipos de cargas (Branco; Bartholomeu; Vettorazzi, 2020).⁵

4 Branco, Bartholomeu e Vettorazzi (2020) apresentam um valor de emissão de 3,9 g de CO₂/m³.km. Considerou-se para todos os efeitos que 1 m³ corresponde a 1 t.

5 Embora as simplificações adotadas para estimativa das emissões aquaviária e dutoviária mereçam críticas, elas representam pouco impacto no balanço das emissões.

Tabela 6. Total de TKU para 2015 e 2035, segmentado por modo de transporte

TIPO DE CARGA	TOTAL TKU (BILHÕES T X KM)		RODOVIÁRIO (%)		FERROVIÁRIO (%)		AQUAVIÁRIO (%)		DUTOVIÁRIO (%)					
	2015	2035	TKU com matriz de 2015	TKU 2035 com matriz de 2035	Δ%	TKU com matriz de 2015	TKU 2035 com matriz de 2035	Δ%	TKU com matriz de 2015	TKU 2035 com matriz de 2035	Δ%			
Carga geral	747,11	1.034,88	852,74	824,80	-27,94	47,60	89,00	41,40	134,53	121,08	-13,45	-		
Granéis minerais	488,12	765,11	114,77	74,22	-40,55	478,96	547,05	68,09	130,07	104,05	-26,01	41,32	39,79	-1,53
Granéis agrícolas	196,44	286,53	186,24	115,47	-70,77	55,30	145,56	90,26	44,99	25,50	-19,48	-	-	-
Granéis líquidos	220,74	303,81	164,06	125,78	-38,28	13,67	95,70	82,03	102,38	50,13	-52,26	23,70	31,90	8,20
Total	1.652,41	2.390,33	1.317,81	1.140,26	-177,55	595,54	877,31	281,78	411,97	300,77	-111,21	65,01	71,69	6,67

Fonte: Elaboração própria, com base em dados de Resende e Cesar (2019e).

As emissões evitadas e acrescidas por modo de transporte e tipo de carga são obtidas pela simples multiplicação das emissões unitárias (Tabela 1, com os complementos citados) e a variação de TKU entre o cenário-base e o projetado (Tabela 6). O resultado é mostrado na Tabela 7, cujos números negativos representam emissões evitadas, enquanto os positivos revelam as acrescidas.

Tabela 7. Balanço de emissões por modo de transporte e tipologia de cargas

MODO DE TRANSPORTE	BALANÇO DE EMISSÕES (MIL T CO ₂)				
	Granel mineral	Granel agrícola	Granel líquido	Carga geral	Total
Rodoviário	-27%	-30%	-25%	-17%	-8.742,61
Ferrovário	16%	41%	16%	27%	3.662,40
Aquaviário	-14%	-11%	-52%	-23%	-485,30
Dutoviário	-23%	0%	123%	0%	26,02
Total	-1.882,36	-1.191,61	-1.820,03	-645,48	-5.539,48

Fonte: Elaboração própria, com base em dados de Resende e Cesar (2019e), EPL e Iema (2021) e Branco, Bartholomeu e Vettorazzi (2020).

Nota: A leitura da tabela deve ser feita da seguinte maneira: por exemplo, a emissão do granel mineral pelo modo rodoviário é 27% multiplicado por -8.742,61. Nesse caso, o resultado é negativo; portanto, trata-se de emissão evitada na comparação entre o cenário-base e o projetado.

Constata-se que o rebalanceamento da matriz de transporte proporciona que se evite a emissão de 5,54 milhões de toneladas de CO₂ na atmosfera por ano, uma redução de 7,1% no total de emissões.

Outra conclusão interessante que pode ser extraída é o ganho marginal em emissões na transferência de cargas da rodovia para modos eficientes, ou seja, quanto cada TKU transferida do caminhão para outros modos de transporte significa em percentual de redução de emissões. Esse resultado pode ser observado na Tabela 8.

Tabela 8. Ganho marginal na transferência de cada TKU da rodovia para os demais modos de transporte (%)

RELAÇÃO ENTRE MODOS DE TRANSPORTE	EMISSIONES			
	Granel mineral	Granel agrícola	Granel líquido	Carga geral
Rodo/ferro	85,3	55,4	87,5	56,3
Rodo/hidro	95,4	92,6	91,7	86,5
Rodo/cabotagem	92,6	88,2	91,6	83,3
Rodo/duto	93,4	-	93,2	-

Fonte: Elaboração própria, com base em dados de Resende e Cesar (2019e), EPL e Iema (2021) e Branco, Bartholomeu e Vettorazzi (2020).

Observa-se na Tabela 8 que a transferência de 1 TKU da rodovia para a ferrovia representa 56,3% em redução de emissões no pior dos casos (carga geral), ou 95,4% no melhor dos casos (transferência de granel mineral da rodovia para a hidrovia). Dito de outro modo, cada TKU de carga geral transferida da rodovia para a ferrovia emite 2,3 vezes menos CO_2 até o limite de 21,9 vezes na transferência do granel mineral da rodovia para a hidrovia. Isso reforça o grande potencial de reduções que se tem na transferência entre modos de transporte, sendo muito difícil atingir o mesmo patamar de mudança apenas com ganhos de eficiência intramodais.

CONCLUSÃO

A proposta deste artigo foi mostrar como uma mudança estrutural na matriz de transporte brasileira, traduzida pela transferência de carga do setor rodoviário para outros modos de transporte mais eficientes, pode resultar em ganhos substancialmente superiores àqueles proporcionados pelas melhorias intrínsecas aos modos de transporte no esforço de descarbonização. Tanto os ganhos marginais quanto os ganhos potenciais da proposta de migração de cargas são largamente superiores aos esforços das medidas intrínsecas.

O artigo explora também o potencial de migração de cargas da rodovia para modos eficientes de transporte, utilizando estudos desenvolvidos por Resende e Cesar (2019e), que partem de uma matriz de transporte originalmente mais equilibrada e, portanto, com menor potencial de transferência de carga para sistemas mais eficientes. A escolha por esses estudos fundamenta-se no fato de serem mais detalhados na segmentação por modo e tipo de carga do que o PNL 2025 (EPL, 2018). Além disso, nos estudos de Resende e Cesar (2019e), o potencial de mitigação anual de CO_2 fica em torno de 5,5 milhões de toneladas por ano, a ser atingido em um horizonte de vinte anos, enquanto o resultado do PNL aponta um potencial de 22 milhões de toneladas a ser obtido em dez anos, o que parece menos plausível.

Apesar da divergência quanto ao ganho potencial entre os dois estudos, é importante ressaltar que o espaço para mitigar a emissão de CO_2 em cada TKU transferida do caminhão para os demais sistemas de transporte é superior aos esforços de redução derivados de aprimoramento de motores, substituição de

fontes de propulsão ou qualquer outra iniciativa de incremento de eficiência intrínseca ao modo de transporte. Além disso, o potencial de transferência de cargas pode ir muito além daquele proporcionado pela implantação de um *pipeline* de projetos mapeados, como parecem mostrar os dados de países como Rússia, Canadá, Austrália, China e Estados Unidos.

Naturalmente, a ênfase na transferência de cargas do rodoviário para os demais modos não deve ser perseguida como única solução para o desafio da descarbonização do transporte de cargas. Ganhos de eficiência intrínsecos a cada modo de transporte podem ter impactos relevantes no conjunto de alternativas, particularmente quando aplicados ao transporte rodoviário, que tem participação superior na matriz de transportes e eficiência energética substancialmente inferior. Além disso, nos espaços urbanos, o uso de caminhões de pouca (ou mesmo zero) emissão é uma demanda cada vez mais comum em favor da saúde pública. Não se pode omitir, no entanto, soluções mais factíveis e menos custosas, ainda que com contribuição mais limitada, como, por exemplo, a utilização do gás natural, especialmente biometano, para os motores; o uso intensivo de tecnologias da informação para gerar mais eficiência nos trajetos; aprimoramentos nos equipamentos de transporte que gerem menor arrasto; entre outras.

Adiciona-se que as alternativas de descarbonização não podem ser pensadas dissociadas do custo de implantação. O fato de o transporte rodoviário ter maior participação na matriz logística decorre principalmente do custo de implantação, expansão e manutenção ser menor que o dos demais modos, principalmente o ferroviário. Além disso, nos investimentos rodoviários, o custo do equipamento (caminhão) não onera o projeto, diferentemente do investimento ferroviário, em que a infraestrutura não é dissociada da operação. Ademais, o transporte rodoviário é muito mais flexível em termos de escala e escopo. Pequenos volumes, curtas distâncias e qualquer tipo de carga podem ser facilmente atendidos por caminhões, diferentemente dos demais transportes, que só são competitivos quando operam em grande escala, além de apresentarem menor flexibilidade nos tipos de cargas que podem ser transportadas.

Por fim, cabe destacar que, embora o esforço por melhorias intrínsecas aos modos de transporte para ganho de eficiência e redução de emissões seja

prioritariamente uma contribuição da iniciativa privada, o principal agente na transformação estrutural do transporte no Brasil em benefício do meio ambiente é a iniciativa pública, que executa o trabalho de planejamento e regulação com incentivo aos operadores para que essa transformação aconteça. O poder público é quem melhor pode equacionar o conjunto de benefícios diretos e externalidades *vis-à-vis* seus custos de implantação, assumindo eventuais custos afundados, riscos de projeto, provendo *funding* e estruturando o financiamento de longo prazo.

REFERÊNCIAS

ANTT – AGÊNCIA NACIONAL DE TRANSPORTES TERRESTRES. Autorizações ferroviárias. *ANTT*, Brasília, DF, [2024]. Disponível em: <https://app.powerbi.com/view?r=eyJrIjojOTQ2MGM4MDUtMmVIYi00MGNmLWFiYjAtMDY0OTJkZWl4OTNiliwidCI6Ijg3YmJlOWRlWE4OTItNGNkZS1hNDY2LTg4Zjk4MmZiYzQ5MCI9>. Acesso em: 18 jan. 2024.

BRANCO, E. H. *et al.* Ações e políticas para redução da emissão de CO₂ no transporte de cargas do Brasil. *Transportes*, [s.l.], v. 31, n. 2, p. e2415, 2023. DOI: 10.58922/transportes.v31i2.2415. Disponível em: <https://www.revistatransportes.org.br/anpet/article/view/2415>. Acesso em: 23 jan. 2024.

BRANCO, J. E. H.; BARTHOLOMEU, D. B.; VETTORAZZI, A. C. Avaliação das emissões de CO₂ na etapa de transporte do etanol: aplicação de um modelo de otimização. *Transportes*, [s.l.], v. 28, n. 1, p. 63-80, 2020. DOI:10.14295/transportes.v28i1.1856. Disponível em: <https://www.revistatransportes.org.br/anpet/article/view/1856>. Acesso em: 23 jan. 2024.

BRASIL. *Lei nº 14.273 de 23 de dezembro de 2021*. Estabelece a Lei das Ferrovias; altera o Decreto-Lei nº 3.365, de 21 de junho de 1941, e as Leis nºs 6.015, de 31 de dezembro de 1973, 9.074, de 7 de julho de 1995, 9.636, de 15 de maio de 1998, 10.233, de 5 de junho de 2001, 10.257, de 10 de julho de 2001, 10.636, de 30 de dezembro de 2002, 12.815, de 5 de junho de 2013, 12.379, de 6 de janeiro de 2011, e 13.448, de 5 de junho de 2017; e revoga a Lei nº 5.917, de 10 de setembro de 1973. Brasília, DF: Presidência da República, 2021. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2019-2022/2021/lei/l14273.htm#:~:text=Art.,associadas%20e%20d%C3%A1%20outras%20provid%C3%AAs. Acesso em: 23 jan. 2024.

BRASIL. Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações. *Estimativas anuais de emissões de gases de efeito estufa no Brasil*. 6ª edição. Brasília, DF: MCTI, 2022. Disponível em: <https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o-mcti/sirene/publicacoes/estimativas-anuais-de-emissoes-gee/arquivos/6a-ed-estimativas-anuais.pdf>. Acesso em: 1º jul. 2024.

DALTO, E. J.; CASTRO, N. T. de S.; PASSOS, P. dos. Shortlines: o desafio de implantá-las no Brasil. *BNDES Setorial*, Rio de Janeiro, v. 29, n. 57, p. [5]-71, mar. 2023. Disponível em: https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/bitstream/1408/23092/1/PRArt_BS%2057_Shortlines_215858.pdf. Acesso em: 23 jan. 2024.

EPE – EMPRESA DE PLANEJAMENTO ENERGÉTICO. *Balanco Energético Nacional: Relatório Síntese 2023*. Brasília, DF: EPE, 2023. Disponível em: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-748/topico-681/BEN_S%C3%ADntese_2023_PT.pdf. Acesso em: 23 jan. 2024.

EPL – EMPRESA DE PLANEJAMENTO E LOGÍSTICA; IEMA – INSTITUTO DE ENERGIA E MEIO AMBIENTE. *Metodologia EPL-IEMA para emissões de GEE e poluentes locais*. São Paulo: Iema, 2021. Disponível em: [https://energiaeambiente.org.br/produto/metodologia-epl-iema-para-emissoes-de-gee-e-poluente-locais#:~:text=Metodologia%20EPL-IEMA%20para%20emissoes%20de%20GEE%20e%20poluentes%20locais,-Veja%20dados%20da&text=Apresenta%20estimativas%20realizadas%20pelo%20IEMA,Logística%202025%20\(PNL%202025\)](https://energiaeambiente.org.br/produto/metodologia-epl-iema-para-emissoes-de-gee-e-poluente-locais#:~:text=Metodologia%20EPL-IEMA%20para%20emissoes%20de%20GEE%20e%20poluentes%20locais,-Veja%20dados%20da&text=Apresenta%20estimativas%20realizadas%20pelo%20IEMA,Logística%202025%20(PNL%202025)). Acesso em: 27 out. 2023.

EPL – EMPRESA DE PLANEJAMENTO E LOGÍSTICA. – *Plano Nacional de Logística PNL – 2025: relatório executivo*. [S.l.]: EPL, 2018. Disponível em: <https://www.ppi.gov.br/wp-content/uploads/2023/01/plano-nacional-de-logisticapnl.pdf>. Acesso em: 23 jan. 2024.

EUROSTAT. EUROPEAN COMMISSION. Database. *Eurostat*, [Luxemburgo], 2024. Disponível em: <https://ec.europa.eu/eurostat/web/main/data/database>. Acesso em: 23 jan. 2024.

ITF – INTERNATIONAL TRANSPORT FORUM. *Decarbonising Argentina's Transport System: Charting the Way Forward*. ITF, Paris, 2020.

OECD – ORGANIZATION FOR ECONOMIC CO-OPERATION AND DEVELOPMENT. OECD.Stat. OECD, [s.l.], [2024]. Disponível em: <https://stats.oecd.org/>. Acesso em: 23 jan. 2024.

RESENDE, P.; CESAR, R. V. *Diagnóstico e projeções para a infraestrutura de logística de transportes no Brasil: cenário otimizado*. Foco no transporte de carga geral. Belo Horizonte: FDC/Plataforma de Infraestrutura Logística de Transportes – PILT, 2019a. Disponível em: <https://nucleos.fdc.org.br/logistica/pilt/>. Acesso em: 23 jan. 2024.

RESENDE, P.; CESAR, R. V. *Diagnóstico e projeções para a infraestrutura de logística de transportes no Brasil: cenário otimizado*. Foco no transporte de graneis líquidos. Belo Horizonte: FDC/Plataforma de Infraestrutura Logística de Transportes – PILT, 2019b. Disponível em: <https://nucleos.fdc.org.br/logistica/pilt/>. Acesso em: 23 jan. 2024.

RESENDE, P.; CESAR, R. V. *Diagnóstico e projeções para a infraestrutura de logística de transportes no Brasil: cenário otimizado*. Foco no transporte de graneis sólidos agrícolas. Belo Horizonte: FDC/Plataforma de Infraestrutura Logística de Transportes – PILT, 2019c. Disponível em: <https://nucleos.fdc.org.br/logistica/pilt/>. Acesso em: 23 jan. 2024.

RESENDE, P.; CESAR, R. V. *Diagnóstico e projeções para a infraestrutura de logística de transportes no Brasil: cenário otimizado*. Foco no transporte de graneis sólidos não agrícolas. Belo Horizonte: FDC/Plataforma de Infraestrutura Logística de Transportes – PILT, 2019d. Disponível em: <https://nucleos.fdc.org.br/logistica/pilt/>. Acesso em: 23 jan. 2024.

RESENDE, P.; CESAR, R. V. *Diagnóstico e projeções para a infraestrutura em logística de transportes no Brasil: cenário otimizado*. [Belo Horizonte]: Fundação Dom Cabral, 2019e. Disponível em: <https://ci.fdc.org.br/AcervoDigital/Relatórios%20de%20Pesquisa/Relatórios%20de%20Pesquisa%202019/Diagnóstico%20e%20projeções%20para%20a%20infraestrutura%20em%20logistica%20de%20transportes%20no%20Brasil.pdf>. Acesso em: 23 jan. 2024.

REVISTA FERROVIÁRIA. Bamin vence leilão de ferrovia e plano é investir R\$ 14 bilhões. *Revista Ferroviária*, [s. l.], 9 abr. 2021. Disponível em: <https://revistaferroviaria.com.br/2021/04/bamin-vence-leilao-de-ferrovia-e-plano-e-investir-r-14-bilhoes/>. Acesso em: 23 jan. 2024.