RBT

REVISTA BRASILEIRA DE TRANSPORTES

BRAZILIAN TRANSPORT JOURNAL

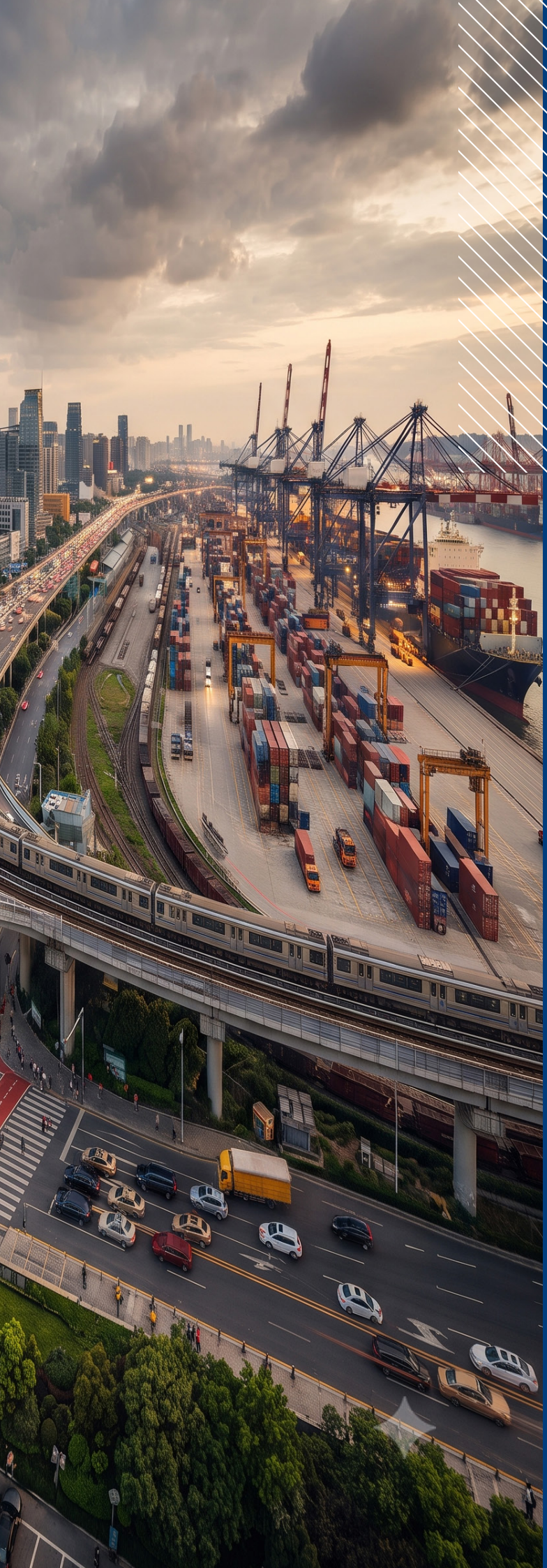
V.6 N.1 | JUL 2026



FGV TRANSPORTES

A **Revista Brasileira de Transportes** - **RBT** é uma publicação para difusão científica, bilíngue, com periodicidade semestral, vinculada ao **FGV Transportes**, centro de estudos e pesquisas em transportes, logística e mobilidade urbana da **FGV**.
Para publicação na **RBT**, serão considerados artigos inéditos, que não devem estar sob avaliação de outro periódico, mesmo que em outro idioma, com a exceção de trabalhos apresentados em anais de congressos. O acesso ao conteúdo da **RBT** é aberto, sem cobrança de qualquer valor pecuniário para submissão ou publicação.
Visite a plataforma da **RBT** e submeta o seu artigo:
http://bibliotecadigital.fgv.br/ojs/index.php/rbt/index.





The **Brazilian Transport Journal** (**Revista Brasileira de Transportes - RBT**) is a bilingual scientific jornal, published every six months, linked to the **FGV Transportes**, centre for studies and research in transport, logistics and urban mobility at the **Getulio Vargas Foundation** (**FGV**). Only unpublished papers will be considered by the **RBT** journal; they should not be under assessment by any other periodical, nor be written in any language other than Portuguese and English, except for papers presented in congress proceedings. Access to **RBT** content is open, with no fees charged for either submission or publication. Visit the **RBT** platform and submit your article: http://bibliotecadigital.fgv.br/ojs/index.php/rbt/index.

REVISTA BRASILEIRA DE TRANSPORTES - RBT

PUBLICAÇÃO DO CENTRO DE ESTUDOS FGV TRANSPORTES
FUNDAÇÃO GETULIO VARGAS – FGV

EQUIPE EDITORIAL

EDITOR CHEFE:
Marcus Vinícius Quintella Cury
FGV Transportes, Brasil.

EDITOR EXECUTIVO:
Marcelo Prado Sucena
FGV Transportes, Brasil.

EDITORES TEMÁTICOS:
Alan Ricardo da Silva
Universidade de Brasília - UNB, Brasil.

Álvaro Fernando de Oliveira Costa
Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto - FEUP, Portugal.

Cassia Bömer Galvão
Universidade do Texas A&M Campus Galveston, EUA.

Gustavo Riente de Andrade
Infraplan Consulting, EUA.

Javier Aldecoa
Colegio Oficial de Arquitectos de Madrid, Espanha.

José Carlos Amorim
Instituto Militar de Engenharia - IME, Brasil.

José Eugênio Leal
Pontifícia Universidade Católica - PUC-Rio, Brasil.

Kent Gourdin
College of Charleston, EUA.

Luiz Antonio Silveira Lopes
Instituto Militar de Engenharia - IME, Brasil.

Luiz Eduardo Brandão
Pontifícia Universidade Católica - PUC-Rio/IAG, Brasil.

Nick Vyas
University of Southern California (USC), EUA.

Patrícia Regina Pinheiro Sampaio
Fundação Getúlio Vargas - FGV Direito, Brasil.

Respício Antonio do Espírito Santo Jr.
Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ/POLI, Brasil.

Rômulo Orrico
Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ/COPPE, Brasil.

AVALIADORES CIENTÍFICOS *AD HOC*:
Altair dos Santos Ferreira Filho
Instituto Militar de Engenharia - IME, Brasil.

Aurélio Lamare Soares Murta
Universidade Federal Fluminense - UFF - Departamento de Administração, Brasil.

Bruno Vieira Bertoncini
Universidade Federal do Ceará/DET, Brasil.

Carlos Eduardo Sanches de Andrade
Universidade Federal de Goiás/ Faculdade de Ciências e Tecnologia, Brasil.

Carlos Manuel Taboada Rodriguez
Universidade Federal de Santa Catarina/Departamento de Engenharia de Produção e Sistemas - Brasil.

Cassiano Augusto Isler
Universidade de São Paulo/USP - Departamento de Engenharia de Transportes, Brasil.

Eduardo Lobo
Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC - PPGTG, Brasil.

Francisco Heber Lacerda de Oliveira
Universidade Federal do Ceará/DET, Brasil.

Gláucia Fernandes Vasconcelos
Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ - COPPEAD, Brasil.

Léo Tadeu Robles
Universidade Federal do Maranhão - UFMA, Brasil.

Leonardo Herszon Meira
Universidade Federal de Pernambuco - UFPE, Brasil.

Newton Narciso Pereira
Universidade Federal Fluminente/ DEP, Brasil.

Orivalde Soares da Silva Júnior
Instituto Militar de Engenharia - IME, Brasil.

Orlando Cattini Júnior
Fundação Getulio Vargas/EAESP, Brasil.

Paulo Afonso Lopes
Instituto Militar de Engenharia - IME, Brasil.

Peter Fernandes Wanke
Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ/COPPEAD, Brasil.

Renata Maré
Universidade de São Paulo - USP/ Escola Politécnica - Instituto Mauá de Tecnologia, Brasil.

Richard Magdalena Stephan
Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ/COPPE/POLI, Brasil.

Susana Carla Farias Pereira
Fundação Getulio Vargas/EAESP, Brasil.

Thiago Guilherme Péra
Universidade de São Paulo - USP/ ESALQ-LOG, Brasil.

APOIO ADMINISTRATIVO:
Valdélia Brito –
FGV Transportes, Brasil

REVISÃO GRAMATICAL E ORTOGRÁFICA:
Jeferson Dantas, Brasil

TRADUÇÃO E REVISÃO DE INGLÊS:
Patrícia Tate, Brasil

DIAGRAMAÇÃO:
Bruno Masello, Brasil

REVISTA BRASILEIRA DE TRANSPORTES – RBT / FGV TRANSPORTES
Rua Barão de Itambi 60 / 805 - Botafogo - Rio de Janeiro – RJ - Brasil

Cep: 22231-000

Submissão de artigos:
http://bibliotecadigital.fgv.br/ojs/index.php/rbt/about/submissions

E-mail:
rbt@fgv.br

Os conceitos, metodologias, métodos, técnicas e propostas expressas nos artigos publicados na RBT são de inteira responsabilidade de seus autores, não representando necessariamente a posição institucional da FGV.

Permitida a reprodução total ou parcial dos artigos, desde que mencionada a fonte.

BRAZILIAN TRANSPORT JOURNAL – RBT

PUBLICATION OF THE FGV TRANSPORTES STUDY CENTER
GETULIO VARGAS FOUNDATION - FGV

EDITORIAL TEAM

EDITOR IN CHIEF:
Marcus Vinícius Quintella Cury –
Getulio Vargas Foundation - FGV Transport, Brazil.

EXECUTIVE EDITOR:
Marcelo Prado Sucena –
Getulio Vargas Foundation - FGV Transport, Brazil.

THEME EDITORS:
Alan Ricardo da Silva
University of Brasília - UNB, Brazil.

Álvaro Costa
Faculty of Engineering of the University of Porto - FEUP, Portugal.

Cassia Bömer Galvão
Texas A&M University, Galveston Campus, USA.

Gustavo Riente de Andrade
Infraplan Consulting, USA.

Javier Aldecoa
Official College of Architects of Madrid, Spain.

José Carlos Amorim
Military Engineering Institute - IME, Brazil.

José Eugênio Leal
Pontifical Catholic University - PUC-Rio, Brazil.

Kent Gourdin
College of Charleston, USA.

Luiz Antonio Silveira Lopes
Military Engineering Institute - IME, Brazil.

Luiz Eduardo Brandão
Pontifical Catholic University - PUC-Rio, Brazil.

Nick Vyas
University of Southern California (USC), USA.

Patrícia Regina Pinheiro Sampaio
Getulio Vargas Foundation - FGV, Brazil.

Respício Antonio do Espírito Santo Jr.
Federal University of Rio de Janeiro - UFRJ, Brazil.

Rômulo Orrico
Federal University of Rio de Janeiro - UFRJ, Brazil.

SCIENTIFIC REVIEWERS AD HOC:
Altair dos Santos Ferreira Filho
Military Engineering Institute - IME, Brazil.

Aurélio Lamare Soares Murta
Federal Fluminense University - UFF, Brazil.

Bruno Vieira Bertoncini
Federal University of Ceará - UFC, Brazil.

Carlos Eduardo Sanches de Andrade
Federal University of Goiás - UFG, Brazil.

Carlos Manuel Taboada Rodriguez
Federal University of Santa Catarina - UFSC, Brazil.

Cassiano Augusto Isler
University of São Paulo - USP , Brazil.

Eduardo Lobo
Federal University of Santa Catarina - UFSC, Brazil.

Francisco Heber Lacerda de Oliveira
Federal University of Ceará - UFC, Brazil.

Gláucia Fernandes Vasconcelos
Federal University of Rio de Janeiro - UFRJ - COPPEAD, Brazil.

Léo Tadeu Robles
Federal University of Maranhão - UFMA, Brazil.

Leonardo Herszon Meira
Federal University of Pernambuco - UFPE, Brazil.

Newton Narciso Pereira
Federal University Fluminente- UFF, Brazil.

Orivalde Soares da Silva Júnior
Military Engineering Institute - IME, Brazil.

Orlando Cattini Júnior
Getulio Vargas Foundation - FGV, Brazil.

Paulo Afonso Lopes
Military Engineering Institute - IME, Brazil.

Peter Fernandes Wanke
Federal University of Rio de Janeiro - UFRJ, Brazil.

Renata Maré
University of São Paulo - USP, Brazil.

Richard Magdalena Stephan
Federal University of Rio de Janeiro - UFRJ, Brazil.

Susana Carla Farias Pereira
Getulio Vargas Foundation - FGV, Brazil.

Thiago Guilherme Péra
University of São Paulo - USP, Brazil.

ADMINISTRATIVE SUPPORT:
Valdélia Brito –
FGV Transportes, Brasil

PORTUGUESE SPELLING AND GRAMMAR REVIEW:
Jeferson Dantas, Brasil

REVISION AND ENGLISH TRANSLATION:
Patrícia Tate, Brasil

LAYOUT AND FINISHED ARTWORK:
Bruno Masello e
Carlos Quintanilha, Brasil

BRAZILIAN TRANSPORT JOURNAL – RBT / FGV TRANSPORTES

Barão de Itambi Street, 60 / 805 floor, Botafogo, Rio de Janeiro, RJ. Brazil, Postal Code 22231-000

Submissions:
http://bibliotecadigital.fgv.br/ojs/index.php/rbt/about/submissions

E-mail:
rbt@fgv.br

The concepts, methods, methodologies, techniques and proposals expressed in the articles published in the RBT are the sole responsibility of their authors, and do not necessarily represent the institutional position of FGV.

Total or partial reproduction of articles is allowed, provided the source is mentioned.

SUMÁRIO / SUMARY

EDITORIAL

8 Revista Brasileira de Transportes - RBT
Brazilian Transport Journal – RBT

ENTREVISTA RBT / RBT INTERVIEW

10 MÁRIO POVIA
Diretor-Presidente do Instituto Brasileiro de Infraestrutura - IBI

Managing Director, Brazilian Infrastructure Institute (IBI)

ARTIGOS / ARTICLES

16 Impactos da reforma tributária nos contratos de concessão de transportes

38 Impacts of the tax reform on transport concession agreements
Rafael Véras de Freitas
UFF/FGV-RJ

60 O ciclo estrutural perverso do transporte rodoviário de cargas: externalidades, falhas de mercado e eficiência da matriz de transporte de cargas no brasil

86 Brazil's perverse structural road freight transport cycle: external factors, market flaws, and freight transport matrix efficiency
Luis Claudio Santana Montenegro *(Neowise Consultoria)*, Rodrigo Tavares Paiva *(Graf Consulting)* e Ana Carolina Capanema Alves

108 Fontes sustentáveis de energia e tecnologias de armazenamento na aviação: uma análise de viabilidade

126 Sustainable energy sources and storage technologies in aviation: a feasibility analysis
Fabriciu Benini e Matheus Rosa

144 Subinvestimento crônico em infraestrutura de transportes no brasil: evidências macroeconômicas, trajetória orçamentária do DNIT, ruptura do financiamento pós-1988 e agenda econométrica

160 Chronic underinvestment in transport infrastructure in brazil: macroeconomic evidence, dnit budget track-record, post-1988 funding disruption, and econometric agenda
Lucas Graziano Paniago
(IDP e UnB)

176 Avaliação da eficiência técnica de terminais hidroviários usando fronteiras estocásticas: uma aplicação em terminais hidroviários na região do baixa amazonas no pará

194 Evaluation of the technical efficiency of waterway terminals using stochastic borders: an application in waterway terminals in the lower amazon region in pará
Paulo Victor Souza Viégas *(UFPA)*, Carolina Costa Ramos *(UFPA)* e Valcir João da Cunha Farias *(UFPA)*

212 Segurança viária e gestão urbana: padrões espaciais e predição de risco de fatalidade entre motociclistas no sistema rodoviário do distrito federal (2014–2023)

232 Urban road safety and management: spatial patterns and predicted fatality risk among motorcyclists in the federal district road system (2014–2023)
Janduhy Pereira dos Santos *(DER/DF)*, Valdir Adilson Steinke, Maurício Theodósio Mattos Marques, Ricardo Sameshima Taba, Andrea Amaziles A. A. de Carvalho Lousada, Bruno Maia Soriano Lousada, Jesus Mauro Vieira de Oliveira e Caroline Ribeiro Chahini

252 Segurança viária de motociclistas em municípios turísticos: proposta educativa de curto prazo baseada na Matriz de Haddon

268 Motorcycle Road Safety in Tourist Municipalities: A Short-Term Educational Intervention Proposal Based on the Haddon Matrix
Deivid Ristow da Costa *(Policia Militar)*

REVISTA BRASILEIRA DE TRANSPORTES - RBT

V.6
N.1
JUL
2026

BRAZILIAN TRANSPORT JOURNAL – RBT

V.6
N.1
2026
JUL

A RBT é uma publicação da FGV Transportes, centro de estudos em transportes, logística e mobilidade urbana da FGV, cujo propósito é contribuir, de maneira incisiva e destacada, para a evolução do pensamento estratégico e para o desenvolvimento acadêmico, empresarial, econômico e social do país, por meio da divulgação de artigos científicos originais e inéditos.

A RBT é publicada exclusivamente em ambiente virtual, com periodicidade semestral, e possui acesso aberto, além de receber submissões de forma contínua por meio de seu endereço eletrônico: https://periodicos.fgv.br/rbt/

Focused on the transport industry, the RBT journal is published by the FGV Transportes Centre for Transport, Logistics, and Urban Mobility. The purpose of this scientific publication is to offer incisive and noteworthy contributions to the progress of strategic thinking and the academic, business, economic, and social development of Brazil, through disseminating original and unpublished papers.

Published half-yearly with open access, the RBT digital journal accepts submissions continuously at the following electronic address: https://periodicos.fgv.br/rbt/

EDITORIAL

A RBT apresenta sua décima-primeira edição, primeira de 2026, composta por sete artigos científicos avaliados e aprovados por nosso competente e dedicado corpo editorial.

Agradecemos aos colegas professores e pesquisadores que participaram da avaliação dos artigos submetidos, assim como aos autores que tiveram seus trabalhos selecionados para compor a presente edição da RBT.

A entrevista desta edição foi concedida por Mário Povia, Diretor-Presidente do Instituto Brasileiro de Infraestrutura - IBI, e aborda temas relevantes como planejamento setorial multimodal, agenda ESG e a descarbonização dos transportes, expansão do transporte multimodal, entre outros assuntos.

O primeiro artigo, intitulado "Impactos da reforma tributária nos contratos de concessão de transportes", foi escrito por Rafael Véras, da FGV.

O segundo artigo, "O ciclo estrutural perverso do transporte rodoviário de cargas: externalidades, falhas de mercado e eficiência da matriz de transporte de cargas no Brasil", teve as autorias de Luis Claudio Santana Montenegro, da Neowise Consultoria, Rodrigo Tavares Paiva, da Graf Consulting, e Ana Carolina Capanema Alves.

O terceiro artigo, "*Sustainable energy sources and storage technologies in aviation: a feasibility analysis*", foi escrito por Fabriciu Benini e Matheus Rosa.

O quarto artigo, "Subinvestimento crônico em infraestrutura de transportes no Brasil: evidências macroeconômicas, trajetória orçamentária do DNIT, ruptura do financiamento pós-1988 e agenda econométrica", foi elaborado por Lucas Graziano Paniago (IDP e UnB).

O quinto artigo, "*Evaluation of the technical efficiency of waterway terminals using stochastic borders: an application in waterway terminals in the lower Amazon region in Pará*", foi escrito pelos pesquisadores da UFPA, Paulo Victor Souza Viégas, Carolina Costa Ramos e Valcir João da Cunha Farias.

O sexto artigo, "Segurança viária e gestão urbana: padrões espaciais e predição de risco de fatalidade entre motociclistas no sistema rodoviário do Distrito Federal (2014–2023)", foi elaborado por Janduhy Pereira dos Santos (DER/DF), Valdir Adilson Steinke, Maurício Theodósio Mattos Marques, Ricardo Sameshima Taba, Andrea Amaziles A. A. de Carvalho Lousada, Bruno Maia Soriano Lousada, Jesus Mauro Vieira de Oliveira e Caroline Ribeiro Chahini.

O sétimo e último artigo, "Segurança viária de motociclistas em municípios turísticos: proposta educativa de curto prazo baseada na matriz de Haddon", foi escrito por Deivid Ristow da Costa, da Policia Militar.

A próxima edição da RBT está prevista para dezembro de 2026. Contamos com o apoio da comunidade das áreas de transportes, logística e mobilidade urbana na divulgação da revista, incentivando professores, pesquisadores e profissionais a submeterem seus artigos científicos por meio da plataforma da RBT.

Vale lembrar que as submissões de artigos devem ser feitas pelo link https://transportes.fgv.br/revista-rbt

Desejamos a todos uma excelente leitura!

Marcus Vinicius Quintella Cury
Editor-Chefe

The RBT journal presents its eleventh edition, the first in 2026, with seven scientific papers that have been reviewed and approved by our competent Editorial Board.

We thank our fellow professors and researchers who helped review the submissions, as well as the authors whose papers were approved for publication in this edition of the RBT journal.

The interview in this edition features Mário Povia, Managing Director of the Brazilian Infrastructure Institute (IBI). He addresses important issues, such as multimode sector planning, the ESG agenda, transport decarbonisation, and multimode transport expansion, among other topics.

Entitled *Impacts of Brazil's Tax Reform on Transport Concession Agreements* the first paper was written by Rafael Véras (FGV).

Examining *Brazil's Perverse Structural Road Freight Transport Cycle: External Factors, Market Flaws, and Freight Transport Matrix Efficiency*, the second paper was written by Luis Claudio Santana Montenegro (Neowise Consultoria), Rodrigo Tavares Paiva (Graf Consulting), and Ana Carolina Capanema Alves.

Exploring *Sustainable Energy Sources and Storage Technologies in Aviation: A Feasibility Analysis*, the third paper was written by Fabriciu Benini and Matheus Rosa.

A *study of Chronic Underinvestment in Transport Infrastructure in Brazil: Macroeconomic Evidence, DNIT Budget Track-Record, Post-1988 Funding Disruption, and Econometric Agenda*, the fourth paper was written by Lucas Graziano Paniago (IDP and UnB).

Presenting an *Evaluation of the Technical Efficiency of Waterway Terminals using Stochastic Borders: An Application in Waterway Terminals in the Lower Amazon Region in Pará*, the fifth paper was written by three UFPA researchers: Paulo Victor Souza Viégas, Carolina Costa Ramos, and Valcir João da Cunha Farias.

Analysing *Urban Road Safety and Management: Spatial Patterns and Predicted Fatality Risks among Motorcyclists in Brazil's Federal District Road System (2014–2023)*, the sixth paper was written by Janduhy Pereira dos Santos (DER/DF), Valdir Adilson Steinke, Maurício Theodósio Mattos Marques, Ricardo Sameshima Taba, Andrea Amaziles A. A. de Carvalho Lousada, Bruno Maia Soriano Lousada, Jesus Mauro Vieira de Oliveira and Caroline Ribeiro Chahini.

Authored by Deivid Ristow da Costa (Military Police), the seventh and final paper assesses *Motorcycle Rider Road Safety in Resort Towns: A Short-Term Educational Intervention Proposal based on the Haddon Matrix*.

The next edition of the RBT journal is scheduled for December 2026. We are confident of support for its dissemination from the transport, logistics, and urban mobility community, encouraging its professors, researchers, and professionals to submit their scientific papers through the RBT platform

Please note that papers should be submitted through the following link: https://transportes.fgv.br/revista-rbt

We wish you all an enjoyable read!

Marcus Vinicius Quintella Cury
Editor-in-Chief

MÁRIO POVIA

Diretor-Presidente do Instituto Brasileiro de Infraestrutura - IBI

MÁRIO POVIA

Managing Director, Brazilian Infrastructure Institute (IBI)

Mário Povia é formado em engenharia pela Universidade Mackenzie e em direito pela Universidade Paulista, com pós-graduação em Administração de Empresas e Direito Processual pelo Mackenzie e MBA em Regulação de Serviços Públicos pela Fundação Getúlio Vargas (FGV).

Foi Secretário Nacional de Portos e Transportes Aquaviários do Ministério da Infraestrutura; Diretor de Gestão Portuária dos Portos do Rio de Janeiro; Diretor-Geral da Agência Nacional de Transportes Aquaviários (Antaq); Presidente do Conselho de Administração dos Portos do Paraná; e Presidente do Conselho de Autoridade Portuária do Porto de São Sebastião.

Atualmente é Diretor-Presidente do Instituto Brasileiro de Infraestrutura (IBI), ligado à Frente Parlamentar Mista de Portos e Aeroportos; Diretor do Departamento de Infraestrutura (Deinfra) da Federação das Indústrias do Estado de São Paulo (Fiesp); Membro do Conselho Nacional do Brasil Export; e Membro do Conselho de Administração da Invest SC.

With degrees in both engineering (Mackenzie University) and law (Paulista University), Mário Povia also holds two MBAs: one in Procedural Law (Mackenzie University) and the other in Public Services Regulation (FGV – Getúlio Vargas Foundation).

He was the National Secretary for Ports and Waterborne Transport at the Ministry of Infrastructure; Port Management Director for the Ports of Rio de Janeiro; Director-General of the National Waterborne Transport Regulator (ANTAQ); Chairman of the Board for the Ports of Paraná; and President of the Port Authority Board at the Port of São Sebastião.

He is currently the Managing Director of the Brazilian Infrastructure Institute (IBI), linked to the Mixed Parliamentary Committee for Ports and Airports; Infrastructure Department (DEINFRA) Director at the São Paulo State Federation of Industries (FIESP); Member of Brazil's National Export Council; and Member of the Invest SC Board of Directors.

RBT – Considerando sua destacada trajetória à frente da Secretaria Nacional de Portos e Transportes Aquaviários, da ANTAQ e, atualmente, do Instituto Brasileiro de Infraestrutura (IBI), quais são, na sua avaliação, as três principais prioridades que deveriam orientar uma política de Estado para infraestrutura de transportes e logística no Brasil nas próximas décadas?

Mário Povia – O primeiro ponto seria um planejamento setorial multimodal tendente a orientar a política pública nos horizontes de médio e longo prazo, detalhando os investimentos públicos e privados necessários, fontes de financiamento e cronograma de execução. A segunda questão seria colocar sob uma mesma pasta ministerial infraestrutura e meio ambiente. A terceira seria uma espécie de pacto federativo entre os entes (União, Estados e Municípios) e entre os Poderes da República (Executivo, Legislativo e Judiciário) em prol da execução deste planejamento, entendendo-o como fundamental para o desenvolvimento sócio econômico do país.

RBT – Apesar dos avanços observados nos setores portuário, ferroviário e rodoviário, a integração entre os diferentes modos de transporte ainda permanece limitada. Quais são os principais obstáculos para o desenvolvimento de uma logística verdadeiramente multimodal, eficiente e competitiva no Brasil?

Mário Povia – A guerra fiscal entre os Estados da federação contribuiu muito para travar esta agenda, acabamos optando pela intermodalidade e não pela multimodalidade, que prevê a contratação de um único frete por assim dizer. Ademais, a burocracia associada à operação e a ausência de uma infraestrutura adequada para os transbordos necessários, cuidaram de limitar as possibilidades de expansão do transporte multimodal. Noutra vertente, a reforma tributária atualmente em curso, conjugada com investimentos em plataformas multimodais aponta para um cenário promissor no médio prazo.

RBT – Underpinned by your outstanding career – heading up Brazil's Ports and Waterborne Transport Bureau, ANTAQ, and currently, the Brazilian Infrastructure Institute (IBI), what are, in your opinion, the three main priorities that should guide a State policy for transport and logistics infrastructure in Brazil for the decades that lie ahead?

Mário Povia – The first point should be multimodal sectoral planning, designed to steer public policy over the medium and long term, with details of the required public and private investments, sources of financing, and execution schedules. The second issue would be to bring infrastructure and the environment under the same ministerial portfolio. The third would be a kind of nationwide pact linking the Federal, State and Municipal tiers of government with the Executive, Legislative and Judiciary branches, which would foster the Implementation of these plans, ranked as crucial for the social and economic development of the nation.

RBT – Despite advances in the port, rail and road sectors, integration among different modes of transport still remains limited. What are the main hurdles hampering the development of efficient, competitive and truly multimodal logistics in Brazil?

Mário Povia – With state tax wars contributing heavily to slowing this agenda, we ended up opting for intermodal networks, rather than the single-shipment contracts of multimodality, so to speak. Furthermore, the complex paperwork associated with these operations, and the absence of adequate transshipment infrastructure continue to curtail multimodal transport expansion possibilities. On the other hand, current tax reforms and investments in multimodal platforms are hinting at a promising outlook for the medium term.

RBT – Os portos brasileiros vêm registrando sucessivos recordes de movimentação de cargas. O que precisa ser feito para que esse crescimento seja acompanhado por ganhos consistentes de produtividade, eficiência operacional e redução dos custos logísticos?

Mário Povia – A provisão de infraestrutura adicional é fundamental para atingirmos um crescimento sustentado, mantendo ou melhorando os níveis atuais de serviço, além da utilização de novas tecnologias, inovação e desburocratização, visando fazer mais com o mesmo. Para tanto, precisamos dar continuidade ao programa de licitação de arrendamentos portuários, carrear investimentos maciços nos acessos terrestres e aquaviários dos portos e corredores logísticos, incentivar a expansão da navegação de cabotagem e realizar as concessões dos principais rios navegáveis, transformando-os em verdadeiras hidrovias. Do ponto de vista da desburocratização, estamos tentando prever na novel legislação portuária, atualmente em revisão, uma espécie de aprovação mais expedita de investimentos e a incorporação de uma espécie de leilão permanente nas áreas disponíveis dos portos públicos, o que não deixa de ser também uma inovação. Cabe citar aqui, noutra vertente, os esforços da Receita Federal do Brasil no sentido de promover liberações mais céleres das cargas envolvidas no comércio exterior, como por exemplo o desembaraço sobre águas e a implantação da Duimp, visando estabelecer uma nova dinâmica em termos de tempos e movimentos, ou seja, aumento de produtividade em prol da facilitação do comércio exterior brasileiro.

RBT – O setor de infraestrutura de transportes tem atraído volumes crescentes de investimentos privados. O atual ambiente regulatório e institucional oferece segurança jurídica suficiente para ampliar ainda mais a participação do capital privado nos projetos brasileiros?

RBT – Brazilian ports have been setting new cargo handling records. What's needed now, to ensure that this growth is accompanied by steady gains in productivity, operating efficiency, and lower logistics costs?

Mário Povia – Providing additional infrastructure is essential for sustained growth. And ensuring we can do more with it means upholding or improving current service levels, together with new technologies, innovations, and streamlined procedures. To this end, we must continue the port lease bidding programme, allocate massive investments to overland and waterborne options, including port access routes and logistics corridors, encourage coastal shipping expansion, and grant shipping concessions along major navigable rivers that will transform them into real waterways. For cutting back on paperwork, new port legislation (which is currently under review) should introduce streamlined investment approvals, with the inclusion of a permanent system auctioning off areas available in public ports, which is another innovation. It is also worth mentioning another aspect here: the efforts of Brazil's Federal Revenue Bureau to fast-track foreign trade cargo clearances, such as in-transit procedures, and the implementation of the DUIMP Single Import Declaration system. Ushering in a new dynamic in terms of times and movements, this will boost foreign trade productivity.

RBT – Brazil's transport infrastructure sector has attracted an upsurge of private investments. Do the current regulatory and institutional contexts offer enough stable legal protection to drive further expansion of private capital stakes in Brazilian projects?

Mário Povia – Nosso ambiente de negócios tem muito a melhorar. Observa-se, entretanto, que o nível de atratividade do setor supera os riscos associados, viabilizando a realização de investimentos mesmo em ambientes adversos, o que não significa dizer que estejamos bem em termos de segurança jurídica e estabilidade regulatória. A judicialização excessiva e o avanço do controle externo sobre questões de mérito regulatório, têm impedido que a regulação setorial siga os contornos definidos na agenda regulatória dos órgãos responsáveis, que é o instrumento que minimamente permite dar previsibilidade para os investidores setoriais.

RBT – A agenda ESG e a descarbonização dos transportes assumem papel cada vez mais relevante na economia global. Como os setores de infraestrutura de transportes e logística podem contribuir para a redução das emissões sem comprometer a competitividade do país?

Mário Povia – Acredito que esta pauta da descarbonização consista mais em uma oportunidade do que em uma dificuldade para o Brasil, que já possui uma matriz elétrica bastante limpa. A competitividade em questão pode ser vista sob dois prismas: (a) do Brasil em relação a outros países: creio que temos condições de sair fortalecidos, dada a possibilidade de produzirmos por aqui os próprios combustíveis alternativos e a partir da utilização de energia elétrica com baixa ou nenhuma emissão de poluentes; e (b) dentre os diferentes modais de transportes: aqui é preciso entender que o transporte rodoviário terá também que contribuir com a redução do uso do óleo diesel, preferencialmente em proporções equivalentes aos das embarcações (bunker), o que manteria o grau de competitividade entre os modais observado atualmente.

Mário Povia – Our business environment has plenty of room for improvement. However, this sector's appeal clearly outweighs the associated risks, attracting investments in even adverse contexts. But this doesn't mean that we are doing well in terms of STABILITY and regulatory stability. Widespread judicialisation and tighter external controls over issues of regulatory merit are preventing sector regulation from aligning with the contours defined in the regulatory agenda drawn up by watchdog entities, which is the instrument establishing the predictability threshold for investors in this sector.

RBT – Transport Decarbonisation and the Environmental, Social, and Governance (ESG) Agendas are playing increasingly relevant roles in the global economy. How can the transport and logistics infrastructure sectors contribute to reducing emissions without blunting Brazil's competitive edge?

Mário Povia – I believe that this Decarbonisation Agenda is more of an opportunity than a hurdle for Brazil, which already has a very clean electricity matrix. This competitive edge may be viewed from two standpoints: (a) looking at Brazil in relation to other countries: I believe that we will emerge even stronger, underpinned by possibilities of producing our own alternative fuels here, in parallel to using electricity with low or no pollutant emissions; and (b) among the various modes of transport: it should be understood that road transport must also contribute through reducing diesel oil consumption, preferably at a rate paced to bunker fuel used by ships. This would maintain current levels of competitiveness among these transport options.

RBT – Diversos estudos apontam que os elevados custos logísticos reduzem a competitividade da economia brasileira. Qual é o impacto dos gargalos de infraestrutura sobre o crescimento econômico, a produtividade e a atração de investimentos produtivos?

Mário Povia – É difícil de precisar este *quantum*, porque há inclusive componentes intangíveis envolvendo áreas que deixam de ser exploradas (plantio ou mineração), por conta da ausência de infraestrutura adequada de transporte. Outro ponto importante a ser observado é a ausência de estruturas de armazenagem visando conter efeitos indesejáveis da sazonalidade de safras, como incremento do custo de transporte e aumento de oferta de produtos reduzindo a margem de lucro dos produtores. Isso vale também para os insumos importados, como fertilizantes. O fato é que qualquer ineficiência provoca perda de competitividade e de imediato a redução de receitas relevantes àqueles que demandam a infraestrutura, sendo certo que investimentos em infraestrutura teriam retorno econômico no curto prazo se comparados com as perdas geradas pela correspondente ausência. A boa notícia é que estamos realizando investimentos relevantes para mitigar estes gargalos, muito embora em ritmo insuficiente para fazer frente a pujança da economia brasileira. Seriam necessários investimentos públicos em volumes maiores em relação ao PIB, sobretudo em projetos com baixa taxa de retorno, preferencialmente através de Parcerias Público-Privadas (PPPs), mas sabemos que as restrições fiscais e as altas taxas de juro vigentes impedem que esse cenário se descortine.

RBT – Entre os projetos atualmente em desenvolvimento ou em fase de estruturação, quais o senhor considera mais estratégicos e transformadores para a logística nacional nos próximos anos?

Mário Povia – Seguramente as concessões dos rios navegáveis encabeçam esta lista, incluindo-se trechos que se pretende explorar diretamente por meio de convênios, como a Hidrovia do Parnaíba e do São Francisco. Temos também as concessões dos canais de acesso dos principais

RBT – Several studies mention high logistics costs that are blunting the competitive edge of the Brazilian economy. What are the impacts of infrastructure bottlenecks on economic growth, productivity, and the attraction of productive investments?

Mário Povia – It's difficult to specify an exact figure here, because there are also intangible components involving areas that are no longer in operation (plantations, mines, etc), due to the absence of adequate transport infrastructure. Another important point is the absence of storage structures that would offset the undesirable effects of seasonal crops, particularly higher transportation costs and supply surges that shrink growers' profit margins. This also applies to imported feedstocks like fertilisers. The fact is that any inefficiency harms competitiveness, immediately slashing revenues for infrastructure users. There's no doubt that investments in infrastructure would produce quick economic rewards over the short term, instead of the losses resulting from their absence. The good news is that we are allocating significant investments that will mitigate these bottlenecks, although not fast enough to keep pace with the dynamism of the Brazilian economy. Government investments at higher percentages of Brazil's GDP would be needed here, especially for projects with low rates of return. Although this would best be handled through Public-Private Partnerships (PPPs), we are well aware that fiscal constraints and high interest rates are blocking the progress of this approach.

RBT – Among the projects currently under development or in the structuring phase, which do you consider the most strategic and transformative for Brazil's logistics during the years ahead?

Mário Povia – Navigable river concessions certainly top this list, including segments earmarked for operation directly through agreements, such as the São Francisco and Parnaíba Waterways. There are also access channel concessions at major Brazilian ports; already launched at ports in Paraná State, this programme is ready

portos brasileiros, cujo programa já foi inaugurado a partir dos portos do Paraná e que deve ser estendido para portos como Itajaí, Santos e Rio Grande. Investimentos ferroviários de grande monta também devem contribuir positivamente para a pauta da logística nacional, cito aqui a renovação das concessões da Vale, da Rumo, da MRS e da FCA/VLI, além das obras da Transnordestina que se encontram em ritmo acelerado. Há outros projetos que ainda não saíram do papel mas que podem ser considerados estratégicos e até mesmo, urgentes: a renovação ferroviária da malha Sul (Rumo) que atende o Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul; a Via Mar em Santa Catarina; a Ferrogrão; a licitação do terminal de contêineres Tecon Santos 10; a terceira descida do sistema Anchieta-Imigrantes; o novo terminal de minérios do porto de Itaguaí; a licitação dos arrendamentos nos portos de São Sebastião e de Itajaí e uma série de terminais de uso privado (TUPs) que se encontram em fase pré-operacional (Imetame e Porto Central) ou de projetos (dezenas).

RBT – O Brasil possui dimensões continentais e uma matriz logística ainda desequilibrada. Olhando para 2040, como o senhor imagina a infraestrutura de transportes ideal para sustentar o crescimento econômico, ampliar a competitividade internacional e melhorar a qualidade de vida da população?

Mário Povia – A matriz ideal é precisamente aquela apontada pelos meios acadêmicos: por água para longas distâncias, por trilhos nas médias distâncias, *first* e *last mile* por rodovias. Dificilmente lograremos êxito em equilibrar a matriz nos próximos anos, mas podemos ao menos mitigar as assimetrias existentes. Creio que as setas estão apontadas para o lado correto, ou seja, muitos investimentos em ferrovias atualmente em curso tendem a elevar sua participação na matriz de transportes, cujas cargas, ao alcançarem os portos, possibilitarão o crescimento também da navegação de cabotagem na costa brasileira. Acredito, entretanto, que será um lento processo de transição até atingirmos os patamares de países com características e dimensões continentais como o nosso.

for extension to other ports, such as Itajaí, Santos and Rio Grande. Major rail sector investments should also contribute positively to Brazil's logistics agenda. Here, I mention renewals of the Vale, Rumo, MRS, and FCA/VLI rail concession, as well as the work on the Transnordestina line, which is progressing at a rapid pace. There are other projects still on the drawing board, but they cannot be considered as strategic or even urgent right now: renovation of the South (Rumo) network rails serving Paraná, Santa Catarina and Rio Grande do Sul States; Via Mar in Santa Catarina; the Ferrogrão grain railway; bidding for the Tecon Santos 10 container terminal; the third lane of the Anchieta-Imigrantes highway system; a new ore terminal at the Port of Itaguaí; bidding for leases at the Ports of São Sebastião and Itajaí, and a string of private use terminals (TUPs) that are currently in the pre-operating phase (Imetame and Porto Central), with dozens of others still at the design stage

RBT – A continent-sized country, Brazil's logistics matrix is still unbalanced. Looking ahead to 2040, how do you envisage its ideal transport infrastructure for upholding economic growth, with a keener competitive edge at the international level, while enhancing the quality of life for all Brazilians?

Mário Povia – The ideal matrix is precisely the solution recommended in academic circles: waterborne for long distances, rail for medium distances, and road for the first and last miles. Although we are unlikely to balance this matrix in the next few years, we can at least even out some of the existing asymmetries. I believe that the arrows are pointing in the right direction, with many investments in railways currently underway tending to expand their share of this transport matrix; once these cargoes reach their ports, this will drive an upsurge in coastal shipping along the Brazilian shoreline. However, I believe that this will be a slow transition process, as we catch up to other countries as huge as Brazil.

ARTIGO 1

IMPACTOS DA REFORMA TRIBUTÁRIA NOS CONTRATOS DE CONCESSÃO DE TRANSPORTES

Rafael Véras de Freitas
UFF/FGV-RJ

RESUMO

O presente ensaio tem por objetivo investigar os impactos da Reforma Tributária no equilíbrio econômico-financeiro dos contratos de concessão de transportes e a natureza do processo de ajuste contratual instaurado pela legislação. Pretende-se analisar a sistemática de apuração material do impacto líquido efetivo sobre os investimentos e a operação (CAPEX e OPEX) dos ativos logísticos, bem como examinar a disciplina e a aplicabilidade dos novos institutos do reequilíbrio reverso e do reequilíbrio cautelar para a continuidade da prestação desses serviços públicos. O trabalho objetiva, ainda, avaliar criticamente a imposição legal de métodos preferenciais para a recomposição dos contratos, à luz do princípio da consensualidade e da sensibilidade tarifária dos usuários, considerando a alta elasticidade da demanda e o risco de migração para modais concorrentes. Por fim, busca-se propor mecanismos de governança regulatória para a gestão administrativa dos pleitos perante as agências de transportes, baseados nas melhores práticas internacionais de *Change of Law*, de modo a afastar a burocracia e a ossificação normativa em face dos longos períodos de transição da Reforma.

Palavras-chave: Reforma Tributária; contratos de concessão; reequilíbrio econômico-financeiro.

ABSTRACT

This paper aims to investigate the impacts of the Tax Reform on the economic and financial equilibrium of transport concession agreements and the nature of the contractual adjustment process established by the legislation. It intends to analyze the material assessment system of the effective net impact on the investments and operation (CAPEX and OPEX) of logistical assets, as well as to examine the rules and applicability of the new mechanisms of reverse rebalancing and precautionary rebalancing for the continuity of the provision of these public services. The work also aims to critically evaluate the legal imposition of preferred methods for contract recomposition, in light of the principle of consensus and users' tariff sensitivity, considering the high demand elasticity and the risk of migration to competing transport modes. Finally, it seeks to propose regulatory governance mechanisms for the administrative management of claims before transport agencies, based on international best practices for *Change of Law*, in order to prevent bureaucracy and regulatory ossification in the face of the Reform's long transition periods.

Keywords: Tax Reform; Concession Agreements; Economic and Financial Rebalancing.

1. INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, os contratos de concessão foram impactados por eventos de grande magnitude – crises econômicas (2008 e 2014), pandemia (2020-2022) e guerras ao redor do mundo (que impactam, diretamente, os custos dos insumos). Foram eventos não provisionados pelas partes, tampouco delineados em suas matrizes de riscos. A crise do equilíbrio econômico-financeiro dos contratos de concessão deu de ombros à crença segundo a qual as matrizes de riscos seriam o bastião da estabilidade e da sustentabilidade econômico-financeira de módulos concessórios. Os cânones do reequilíbrio mecanicista e ergódico malfadaram. Ficamos atentos a este estado de coisas e observamos que a renegociação passou a fazer parte de um regime experimental de reequilíbrio, em situações qualificadas como incertezas (Freitas, 2023).

Mas, neste ano, teremos um desafio conhecido de todos: a Reforma Tributária empreendida pela Emenda Constitucional n° 132/2023 e pela Lei Complementar n° 214/2025. Trata-se, talvez, da maior reforma tributária sobre o consumo da história brasileira: daremos adeus ao PIS, à COFINS, ao ICMS e ao ISS, e as boas-vindas ao IBS e à CBS, no bojo de um IVA dual.

E as concessões? Simples: o art. 9°, §3°, da Lei n° 8.987/1995 prescreve que "ressalvados os impostos sobre a renda, a criação, alteração ou extinção de quaisquer tributos ou encargos legais, após a apresentação da proposta, quando comprovado seu impacto, implicará a revisão da tarifa, para mais ou para menos, conforme o caso".

Nesse quadrante, o desequilíbrio experimentado em módulos concessórios deverá ser calculado com base, única e exclusivamente, no incremento da carga tributária direta? Eis o tema do presente ensaio. Alvitra-se, pois, investigar em que medida a Reforma Tributária se constituirá como um evento desequilibrante, bem como a forma pela qual serão endereçados os efeitos econômico-financeiros decorrentes da novel legislação.

Para tanto, percorremos o seguinte caminho: em um primeiro momento, investigaremos como será constituído o evento desequilibrante produzido pela Reforma Tributária. Em seguida, o ensaio perpassará pelos efeitos indiretos que serão produzidos pela Reforma Tributária nos módulos concessórios. Na sequência, o ensaio se volta a interpretar o procedimento cautelar de reequilíbrio trazido pela reforma, o qual será de grande utilidade, na medida em que serão construídos distintos crivos de reequilíbrios experimentais em seu período de transição. O quarto tópico se dedicará a analisar as formas indicadas, pela novel legislação para reequilibrar os contratos de concessão em razão da Reforma Tributária. Por fim, serão apresentadas propostas de governança regulatória para os pleitos de reequilíbrio apresentados em decorrência da Reforma Tributária, especialmente para sua regulamentação.

2. O DELTA DE DESEQUILÍBRIO PROVOCADO PELA REFORMA TRIBUTÁRIA E O PROCESSO EXPERIMENTAL DE RENEGOCIAÇÃO

De acordo com as melhores práticas internacionais em concessões e PPPs, os riscos de mudanças legislativas são assumidos pelo poder concedente, pois a concessionária foi contratada para fornecer um projeto dentro de um ambiente jurídico conhecido, possuindo meios limitados de compensar consequências adversas advindas de alterações legislativas inesperadas (GI Hub, 2019).

Entre nós, a primeira reação à reforma traz à evidência a aplicação do art. 9°, §3°, da Lei n° 8.987/1995. Tal previsão normativa materializa um risco, *ex lege*, que foi aprioristicamente alocado ao poder público. Isso importa dizer que, se um novo encargo tributário influenciar na proposta comercial apresentada, quando da licitação, o concessionário terá direito ao reequilíbrio econômico-financeiro do seu contrato, em atendimento ao disposto no art. 37, XXI, *in fine*, da CRFB.

De fato, o exercício de competências tributárias é um dos mais salientes exemplos de "Fato do Príncipe" (Oliveira, 2015). Nesse sentido, como bem observado por Marçal Justen Filho (2000), a instituição de exações fiscais que onerem de modo específico o cumprimento da prestação rompe o equilíbrio econômico-financeiro, exigindo-se um vínculo direto entre o encargo e a prestação. No mesmo sentido, Floriano de Azevedo Marques Neto (2002), pontua que o emprego de poder político para o exercício de competências tributárias constitui evidente "fato do príncipe".

Note-se: o "risco do exercício da competência tributária", que é uma prerrogativa do poder público, é, aprioristicamente e por lei alocado como um risco do Poder Concedente. Nada mais consentâneo com o racional que norteia a repartição de riscos dos contratos de concessão, segundo o qual os efeitos econômico-financeiros dos eventos que tiverem lugar no devir de sua execução devem ser suportados pela parte que tem melhores condições de evitar sua ocorrência ou de absorvê-lo a um custo mais baixo (Banco Mundial, 2015).

Assunto resolvido? Cético, prefiro examinar a legislação. O art. 374 da Lei Complementar n° 214/2025 vaticina que "os contratos vigentes na entrada em vigor desta Lei Complementar celebrados pela administração pública direta ou indireta da União, dos Estados, do Distrito Federal e dos Municípios, inclusive concessões públicas, serão ajustados para assegurar o restabelecimento do equilíbrio econômico-financeiro em razão da alteração da carga tributária efetiva suportada pela contratada em decorrência do impacto da instituição do IBS e da CBS, nos casos em que o desequilíbrio for comprovado".

Nesse quadrante, é de se indagar: a nova sistemática tributária impactará sempre e aprioristicamente os custos de investimentos (CAPEX) e operacionais (OPEX) dos ativos e, por conseguinte, o VPL do contrato de concessão? Não. Como visto, o normativo não instalou um direito ao reequilíbrio *per se*. Criou, sim, um direito à instauração de um processo de "ajuste" contratual, consubstanciando uma renegociação experimental de reequilíbrio (Freitas, 2023), traduzida em um amplo "encontro de contas".

Forte na neutralidade tributária alvitrada pela reforma, o concessionário terá de demonstrar que, do Fluxo de Caixa Original, lastreado na carga anterior, descontados a alíquota incremental, os creditamentos do novo regime, a extinção de isenções e a possibilidade de repasse a terceiros, restará um Delta capaz de reduzir a TIR e o VPL do projeto. Tal Delta, positivo ou negativo, definirá quem experimentará o desequilíbrio.

A construção deste "Delta" me parece a pedra de toque para o sucesso dos novidadeiros procedimentos de renegociação experimental de reequilíbrio celebrados em decorrência da Reforma Tributária. Isso porque, de acordo com Frederico Turolla (2024), a mudança da base de incidência, da receita bruta para o valor adicionado, pode gerar impactos relevantes, uma vez que os contratos foram estruturados sob o modelo anterior.

Claro que nem todo contrato tem seu crivo de equilíbrio plasmado em um Plano de Negócios. Daí a necessidade de se encontrar este Delta a partir da repristinação do Plano ou da construção de um Fluxo de Caixa Marginal. Tal impacto espraiará seus efeitos por toda a concessão, sendo trazido a valor presente e permeando tanto o período de transição (2026/2033) quanto a implementação definitiva.

O art. 374, §1°, 'a', da LC n° 214/2025 preceitua que a carga tributária efetiva deve considerar os efeitos da não cumulatividade e as regras de apuração de créditos. Em breve síntese, os concessionários terão de comprovar: (i) o incremento nos impactos experimentados na realização de novos investimentos (CAPEX); (ii) os incrementos nos custos dos insumos; (iii) o incremento dos custos operacionais de operação e manutenção do ativo (OPEX); e (iv) os custos que serão suportados para a implementação do novo Sistema Tributário, seja para o cumprimento das novas obrigações principais, seja para o cumprimento das novas obrigações acessórias. Essa rubrica conterá o delta preliminar entre a alíquota e os creditamentos apropriados.

Considerando o período de transição de regimes, a simples comparação entre alíquotas não será serviente. O contratado demonstrará quais créditos serão usados, em que medida a alteração da base de cálculo impactará o CAPEX e o OPEX e como esse encontro de contas afetará a carga tributária efetiva.

O art. 374, §1°, 'b', de seu turno, exige considerar a "possibilidade de repasse a terceiros". Tal previsão está direcionada a comprovar quem será o efetivo responsável econômico pelo pagamento do tributo alterado (o usuário, o poder público, os terceiros contratados ou a própria concessionária). Dito em outras palavras, independente de quem será o sujeito passivo legal, o dispositivo se vale do conceito de responsável econômico. Suponha-se um exemplo de uma concessão de rodovias. Caso não haja substitutos adequados (em que há uma inelasticidade de demanda), na hipótese de o incremento tributário ser automaticamente repassado para a tarifa (sem prejuízo à modicidade tarifária), não há que se contabilizar os efeitos da reforma para os efeitos do acordo experimental atrelado à Reforma Tributária de que aqui se trata.

Assim é que, se é certo que parcela dos novos custos serão automaticamente repassados para tarifa, quando for possível, não é menos exato que esses desequilíbrios serão suportados até a ultimação da próxima revisão tarifária. De outro lado, a externalização dos impactos para os terceiros contratados pelas concessionárias, será ainda mais desafiadora, na medida em que dependerá do êxito de poder de barganha entre as concessionárias e seus fornecedores.

Já o art. 374, §1º, 'c', incorpora à compensação os impactos do período de transição (arts. 125 a 133 do ADCT). A previsão encampa a diretriz do art. 23 da LINDB, exigindo regime de transição para novos condicionamentos de direito. Cuidar-se-á da formação de um equilíbrio intermédio, equacionando dois regimes tributários com créditos parciais e *compliance* duplicado.

Por fim, o art. 374, §1º, 'd', prescreve a consideração dos benefícios fiscais extintos. Essa previsão justifica-se, pois, a viabilidade econômica de concessões é frequentemente lastreada em isenções e regimes especiais. Toda a engenharia econômico-financeira sofrerá impactos, o que será ainda mais saliente em setores sensíveis como iluminação pública, saneamento, mobilidade urbana e PPPs com grande investimento inicial.

Para além da formação deste Delta, tenho para mim que os impactos no equilíbrio econômico-financeiro serão experimentados em uma miríade de outros aspectos não previstos na novel legislação, que poderão integrar os pleitos de reequilíbrio formulados pelos concessionários.

3. OS IMPACTOS INDIRETOS PRODUZIDOS PELA REFORMA TRIBUTÁRIA EM MÓDULOS CONCESSÓRIOS

Para além dos impactos diretos, os módulos concessórios experimentarão impactos indiretos. O primeiro deles afeta os Indicadores Financeiros (como Índices de Cobertura de Dívidas, Liquidez ou Alavancagem), podendo deflagrar eventos de cura junto aos financiadores em Acordos Tripartites ou impactar obrigações de desempenho, gerando deflatores tarifários. Isso tudo terá um custo que não poderá passar despercebido pelo regulador.

Ademais, embora diversos contratos atribuam o risco de financiamento ao concessionário, as consequências econômicas provocadas por atos normativos estatais fogem à precificação original, que engloba apenas riscos ordinários de captação. Consoante o *Global Infrastructure Hub* (2019), alterações abruptas decorrentes de decisões do Poder Concedente atraem para o Estado o risco pelos efeitos no custo do financiamento. Vitor Soliano (2025) reforça essa lógica ao destacar a estrita correlação entre a prestação do serviço e a obtenção de receitas (*funding*) para amortizar o capital aportado (*financing*). Logo, a alteração unilateral dessas premissas pela Reforma Tributária obrigaria as concessionárias a injetar capital próprio para evitar a inadimplência, efeito reflexo que exige guarida na renegociação experimental.

A reforma também produzirá efeitos diretos na demanda. Tradicionalmente alocado ao parceiro privado, erros

na previsão desse risco geraram insolvências, levando organismos como o *Global Infrastructure Hub* (2016) e o *International Institute for Sustainable Development* (2026) a recomendarem seu compartilhamento eficiente para garantir o *Value for Money*. Os estudos concluíram, ainda, que, por mais que a concessionária seja capaz de gerenciar determinados riscos associados à demanda, tais quais os riscos tecnológicos relativos à cobrança de pedágio, não seria razoável exigir do parceiro privado a mesma capacidade de gestão de riscos que fogem do escopo negocial, como crescimento populacional ou uma pandemia. Nesse quadrante, a alocação apriorística e acrítica de todo e qualquer risco de demanda à concessionária acabaria redundando em ineficiências contratuais. Diante disso, as melhores práticas atuais passaram a privilegiar o compartilhamento do risco de demanda entre concessionária e Poder Concedente, sobretudo no que diz respeito a eventos imprevisíveis.

No direito brasileiro, inicialmente, consolidou-se o entendimento, com lastro em transposição irrefletida da teoria das áleas dos contratos administrativos instrumentais, de acordo com o qual, em contratos de logo prazo, o risco da demanda deveria ser assumido, pelo concessionário, por se tratar de um risco intrínseco ao projeto concessionário e, portanto, deveria ser precificado pelo operador privado.

Acontece que tal entendimento foi se modificando ao longo do tempo. O próprio risco de demanda, antes tido como um claro exemplo de álea ordinária, tem recebido um tratamento distinto em contratos de concessão mais recentes, que preveem bandas de compartilhamento entre as partes. Mas fato é que, para além de tal repartição do risco de demanda ser uma tendência nos contratos de infraestrutura, o poder público atrai para si tal risco se vem a praticar um ato comissivo ou omissivo que influencia a demanda do projeto concessionado. É que a infraestrutura não é instalada nas nuvens; não existe a partir "do nada". Toda a sua demanda decorre das condições de operação de itinerários, de outros modais e, para os fins da presente investida, da localização de usuários.

É precisamente o que se passará como um efeito reflexo da Reforma Tributária.

É que, à medida que a tarifa experimentará incrementos em seu numerário, usuários de modais de mobilidade urbana, rodovias e aeroportos poderão migrar para um modal concorrente, especialmente em setores que têm a sua elasticidade sensível ao valor da tarifa (Shapiro *et al.*, 2013). Haverá, pois, a migração de demanda para serviços substitutos. De outro lado, por evidente, se, com a redução da alíquota, for experimentado um incremento de demanda, tais externalidades terão de ser repartidas entre as partes. A elasticidade da demanda, claro, também poderá produzir efeitos concretos em determinados segmentos de usuários, os quais não poderão ser desconsiderados no procedimento de ajuste que ora se investiga.

Outro aspecto que poderá produzir efeitos na demanda é a alteração da tributação da origem para o destino. Com a alteração da localização de usuários, os fluxos logísticos da infraestrutura poderão restar modificados, o que poderá provocar impactos diretos da demanda de uma concessão de rodovias, por exemplo. Tal alteração impõe o reequilíbrio, por consubstanciar alteração unilateral (art. 9º, §4º, da Lei nº 8.987/1995) e impactar as "condições do contrato" (art. 10 da mesma lei).

Corroborando essa necessidade de revisão ampla, o §2° do art. 374 da Lei

Complementar nº 214/2025 prescreve a aplicação do reequilíbrio "inclusive àqueles contratos que já possuem previsão em matriz de risco que impactos tributários supervenientes são de responsabilidade da contratada". Embora a lei já alocasse o risco de Fato do Príncipe ao Estado, contratos ineficientes disciplinavam a matéria de forma diversa. Como preleciona Harb (2012), a base objetiva do negócio reside nas condições atestadas no planejamento prévio. Nesse quadrante, o dispositivo reconhece que, ainda que os riscos decorrentes de alterações da carga tributária tenham sido trespassados ao concessionário, fato é que a Reforma Tributária, por seus impactos salientes, subverteria tal ordem de previsão contratual.

Resumindo o exposto até aqui: (i) a Reforma Tributária não instalou, pois, um direito ao reequilíbrio, per se; (ii) criou, neste quadrante, um direito à instauração de um processo de "ajuste" contratual, de renegociação experimental de reequilíbrio; (iii) para o deferimento do pleito de reequilíbrio, o concessionário terá de demonstrar que, do Fluxo de Caixa Original, que fora lastreado em determinada carga tributária anterior, descontados o valor da alíquota incremental, os valores dos creditamentos tributários decorrentes do novo regime, a extinção de isenções fiscais e a possibilidade ou não do repasse desta majoração a um terceiro, há um Delta que reduzirá a TIR e o VPL do projeto; e (iv) os impactos no equilíbrio econômico-financeiro nos contratos de concessão serão experimentados em uma miríade de aspectos econômicos e financeiros para além dos estimados pela Reforma Tributária, tais como os relacionados ao cumprimento de indicadores financeiros, aos riscos de demanda e de financiamento, os quais poderão merecer uma ampla renegociação do contrato de concessão.

4. O REEQUILÍBRIO CAUTELAR EM RAZÃO DA REFORMA TRIBUTÁRIA

O art. 375 do novel diploma prescreve a "revisão de ofício" para o restabelecimento do equilíbrio quando constatada a redução da carga tributária efetiva. Cuida-se do denominado reequilíbrio reverso, materializado caso o Delta represente um valor adicionado positivo ao concessionário. A expressão "revisão de ofício", contudo, não torna o processo administrativo despiciendo – o que seria inconstitucional por violar o contraditório e a ampla defesa. Na verdade, a expressão denota a prerrogativa do Poder Concedente de instaurar o procedimento, e não a competência para constituir unilateralmente um crédito regulatório sem a devida apuração dos impactos reais. Cuida-se, pois, de previsão que impõe a instauração do mesmo procedimento administrativo, no âmbito do qual serão analisados os aspectos previstos nas alíneas "a", "b", "c" e "d", do §1°, do art. 374, mas que poderá importar em um desequilíbrio em favor do poder concedente.

Paralelamente, o art. 376 faculta à contratada pleitear o reequilíbrio verificado no período de transição (arts. 125 a 133 do ADCT). O dispositivo confere duas alternativas: ingressar com pleitos parciais a cada alteração ou com um pleito único abrangendo todo o período. A construção de múltiplos equilíbrios experimentais e incrementais (primeira alternativa) me parece a melhor opção, por se compatibilizar com a *ratio* da reforma e permitir a adaptação às supervenientes Resoluções do Senado e a outros impactos descortinados ao longo do tempo.

Para além disso, a meu sentir, tal normativo estabeleceu uma modalidade de reequilíbrio cautelar. O §4º do art. 376 permite a implementação provisória da compensação, caso a contratada demonstre relevante impacto financeiro

na execução, fixando o §2º um prazo de 90 dias para a decisão definitiva.

Tal providência encontra amplo amparo no ordenamento. A efetividade da tutela, pilar do Código de Processo Civil (arts. 300 e 301) e da Constituição (art. 5º, XXXV), aplica-se inexoravelmente ao processo administrativo. Não por outra razão, André Luiz Pereira de Oliveira (2008) afirma que a tutela de urgência visa dar a melhor resposta ao cidadão, acautelando o direito do risco de que a decisão final se torne intempestiva ou inútil.

Na legislação esparsa, as cautelares atípicas encontram previsão no art. 45 da Lei nº 9.784/1999 (risco iminente) e extraem fundamento prático do art. 20 da LINDB. Consoante Floriano de Azevedo Marques Neto (2019) e Marçal Justen Filho (2018), prospectar os efeitos e cenários resultantes da decisão presta homenagem à responsividade estatal. A cautelaridade reside justamente em aferir, *ex ante*, as consequências nefastas da postergação do reequilíbrio.

E o tempo produz impactos salientes. Os investimentos realizados pelo prestador configuram um verdadeiro "financiamento" ao Poder Concedente, a ser amortizado pelas receitas da concessão. Atrasar o reequilíbrio equivale a atrasar o pagamento desse financiamento, incrementando o seu montante, em manifesta violação à economicidade (Câmara *et al*., 2022). Como alerta Rafael Wallbach Schwind (2025), a demora agrava situações contratuais anômalas, comprometendo investimentos, a qualidade dos serviços e a financiabilidade dos empreendimentos. O tempo produz consequências econômicas em módulos concessórios. Tanto é verdade que o adiantamento ou atraso dessas obrigações produzem impactos diretos na remuneração dos concessionários.

Assim, por exemplo, cite-se que, ao menos desde a 3ª Etapa do Programa de Concessões de Rodovias Federais (PROCROFE), os Contratos de Concessão regulados pela Agência Nacional de Transportes Terrestres (ANTT) preveem o instrumento do "Acréscimo de Reequilíbrio", comumente denominado "Fator A". A título de exemplo, cita-se o Contrato do Edital de Concessão nº 03/2013, referente à BR-070/163/MT e outorgado à Concessionária Nova Rota do Oeste S.A. (CNRO). Tal contrato de concessão define, em sua Cláusula 1.1.1, (i), o acréscimo de reequilíbrio como percentual que será incrementado na tarifa básica de pedágio. Cuida-se de mecanismo cujo desiderato é precisamente o de preservar a equivalência contratual entre os serviços prestados e a respectiva remuneração, em função da antecipação de obras de ampliação de capacidade e melhorias.

Mais recentemente, a Resolução ANTT nº 6.032/2023, que aprovou a Terceira Norma do Regulamento das Concessões Rodoviárias (RCR 3), dispõe, nos termos do art. 96, que o Fator A é aplicável em razão da conclusão antecipada de obrigações, desde que previamente autorizado pela Superintendência competente. Ademais, os arts. 146 e 147 da RCR 3 estabelecem que as repercussões de antecipações devem ser apuradas anualmente em sede de Revisão Ordinária, recompondo os efeitos financeiros no âmbito do fluxo de caixa ou mediante a aplicação de indicadores, em que se inclui o Fator A.

A cautela, portanto, reside em assegurar a sustentabilidade econômico-financeira do projeto, e, ainda, resguardar a efetividade do procedimento como um todo. Por isso também a obrigação do concessionário em restituir os danos correlatos aos pedidos, quando julgados parcial ou totalmente improcedentes, no tocante ao mérito ou à extensão dos seus efeitos.

São precisamente estes os fundamentos jurídicos dos pleitos cautelares de que tratam o art. 376 da Lei Complementar nº 214/2025. A regulamentação desse reequilíbrio cautelar no âmbito da Reforma (§3º do art. 376) poderá se valer da exitosa experiência regulatória recente.

O marco inicial deu-se com a Portaria MInfra nº 1.166/2021, que conferiu realismo aos contratos portuários de longo prazo ao permitir a suspensão de obrigações de desempenho ou investimento ante a probabilidade do direito e o perigo da demora, mediante decisão fundamentada. A relevância da Portaria MInfra nº 1.166/2021, ao incluir o instituto do reequilíbrio cautelar à Portaria MInfra nº 530/2019, diz com a possibilidade de o poder público conferir uma vertente mais realista ao equilíbrio econômico-financeiro de contratos de longo prazo. É que tais medidas podem ter por objeto a suspensão total ou parcial de obrigações contratuais de desempenho, investimento, pagamento e qualquer outra medida idônea para a garantia do direito, não ensejando a aplicação das respectivas penalidades, quando as "obrigações de investimento" e "obrigações de desempenho" enredadas no contrato não forem executadas em virtude do deferimento da cautelar.

Posteriormente, o Estado de São Paulo, amparado no Parecer NPT nº 77/2023 da PGE/SP, editou a Resolução SPI nº 19/2023. O normativo, fundado nos princípios da eficiência, economicidade e continuidade do serviço público, autorizou medidas cautelares para mitigar impactos superiores a 5% da arrecadação bruta da concessionária ou que ameaçassem a continuidade do serviço e a solvência. De forma prudente, a norma paulista limitou o reequilíbrio cautelar a 80% do impacto estimado, vedando o recebimento de recursos antes do efetivo desequilíbrio.

A motivação para a edição do ato normativo, conforme expresso em seus "considerandos", decorre do fato de que diversos pleitos de reequilíbrio envolvem temas de elevada complexidade. Em razão disso, a análise dos processos administrativos tende a prolongar a definição do montante a ser objeto do reequilíbrio econômico-financeiro. Esse lapso temporal, aliado à persistência de contratos desequilibrados, tende a aumentar o valor final do desequilíbrio contratual, além de comprometer os indicadores financeiros das concessionárias de serviço público. Nesse sentido, a aplicação do reequilíbrio cautelar constitui faculdade do Poder Concedente, na forma do art. 2º, I, da Resolução SPI nº 19/2023. As medidas passíveis de adoção, para fins de reequilíbrio cautelar, estão listadas no art. 2º, III, do ato normativo, em rol não exaustivo.

Ressalte-se que a Resolução SPI nº 19/2023 estabelece limitações à aplicação do reequilíbrio cautelar. Nesse quadrante, o art. 3º, § 4º, do ato normativo, dispõe que o reequilíbrio cautelar só poderá ser manejado se o evento desequilibrante: (i) já tiver sido definitivamente reconhecido pela entidade competente, restando apenas a mensuração do seu impacto; ou (ii) possa ser presumido, em razão da similaridade com eventos de desequilíbrio já definitivamente reconhecidos pelo órgão competente no próprio contrato ou em outros contratos do mesmo setor. Ademais disso, o reequilíbrio cautelar é limitado a 80% do impacto econômico-financeiro estimado e não poderá importar em recebimento de recursos antecipadamente ao efetivo impacto financeiro causado pelo evento desequilibrante, nos termos do art. 6º, parágrafo único, da Resolução SPI nº 19/2023.

Em âmbito federal, a Instrução Normativa ANTT nº 33/2024 trilhou caminho semelhante, instituindo o

reequilíbrio parcial de natureza cautelar (para urgências e impactos superiores a 2% da receita bruta) e o *reequilíbrio parcial baseado em evidências* (para direitos incontroversos de apuração complexa). Assim como em São Paulo, as medidas mitigadoras da ANTT possuem natureza precária, dependem de comum acordo e são limitadas à antecipação máxima de 80% do valor estimado.

Há, portanto, de se concluir que alguns ensinamentos extraíveis da disciplina do instituto do Reequilíbrio Cautelar poderão orientar a sua regulamentação no âmbito da Reforma Tributária, tais como: (i) o de que o reequilíbrio cautelar predica a constituição de um crédito em favor da concessionária, bem como uma análise preliminar sobre o seu direito e sobre o perigo da demora em sua implementação; (ii) o seu deferimento será imperioso na hipótese de uma situação emergencial, a exemplo de ameaças de soluções de continuidade a serviços públicos, ou no incremento exorbitante do débito do poder Público; (iii) a previsão de que o pleito acautelatório seja de parte do reequilíbrio, e não de seu valor integral; (iv) a reversibilidade de medida, se for caso. Para além disso, é de se registrar que, por óbvio, a ausência de regulamentação não interditará a apresentação de pleitos pela concessionária. Afinal, cuida-se de direito que se extrai da Constituição, das leis de processos administrativos e da própria Lei Complementar n° 214/2025. Nada obstante, o tema da governança regulatória dos pleitos de reequilíbrio econômico-financeiro será retomado, doravante, no último tópico deste ensaio.

5. AS FORMAS DE REEQUILÍBRIO DECORRENTES DA REFORMA TRIBUTÁRIA

O art. 376, V, da Lei Complementar prescreve que o desequilíbrio experimentado pela constatação do Delta, de que tratei no primeiro tópico, poderá ser implementado, por intermédio dos seguintes expedientes: (i) revisão dos valores contratados; (ii) compensações financeiras, ajustes tarifários ou outros valores contratualmente devidos à contratada, inclusive a título de aporte de recursos ou contraprestação pecuniária; (iii) renegociação de prazos e condições de entrega ou fornecimento de serviços; (iv) elevação ou redução de valores devidos à administração pública, inclusive direitos de outorga; (v) transferência a uma das partes de custos ou encargos originalmente atribuídos à outra; (vi) outros métodos considerados aceitáveis pelas partes, observada a legislação do setor ou de regência do contrato.

Vamos a elas. A doutrina jusadministrativa clássica (Justen Filho, 2003) classifica as modalidades de reequilíbrio econômico-financeiro como internas ou externas ao contrato. As primeiras são aquelas em "que se promoverá a recomposição da equação econômico-financeira sem recorrer a direitos ou deveres desvinculados do seu âmbito". Já as modalidades externas serão as "medidas ou providências que extrapolem os limites da própria concessão".

Trata-se de exemplos de formas de reequilíbrio que não exaurem a miríade de mecanismos juridicamente

e economicamente viáveis para se operacionalizar o reequilíbrio dos contratos de concessão. Para além disso, Rafael Schwind (2025), em trabalho específico sobre as formas de reequilíbrio, aduz que "os mecanismos 'tradicionais' por vezes não dão conta das necessidades existentes. Daí surge a necessidade de se encontrar soluções 'heterodoxas' de reequilíbrio, que, além de compatíveis com o ordenamento, sejam capazes de recompor a equação econômico-financeira e ao mesmo tempo contornar as dificuldades existentes nos mecanismos tradicionais".

A miríade de formas de recomposição do equilíbrio econômico-financeiro é bem ilustrada, nas lições de Thiago Marrara e Gustavo Gil Gasiola (2015), para quem os contratos de concessão são abertos em relação aos meios de que dispõem o Poder Concedente para promover o reequilíbrio da concessão, desde que a solução favoreça a continuidade do projeto em benefício de uma ponderação equânime dos interesses das partes.

Daí porque, diante da existência de variadas formas de reequilíbrio, a escolha da alternativa a ser manejada, para dar conta dos eventos desequilibrantes da razão da Reforma Tributária, dependerá da conjugação de dois fatores: (i) a análise das particularidades inerentes a cada projeto concessionário, sendo inviável, por exemplo, adotar como forma de recomposição a "ampliação da remuneração do particular" em contratos que não preveem a remuneração da Concessionária por tarifa; (ii) a aptidão do mecanismo de reequilíbrio escolhido para neutralizar os efeitos econômico-financeiros suportados pela parte que não assumiu o risco do evento desequilibrante. Assim, por exemplo, é de se destacar que poderá ser inadequado recompor o reequilíbrio mediante o manejo da variável prazo se, em determinada circunstância, a Concessionária necessitar de recursos imediatos para mitigar os impactos da Reforma Tributária. Em casos tais, o contrato de concessão não restará financeiramente reequilibrado.

O mais importante, neste particular, é que a forma (ou as formas) de reequilíbrio econômico-financeiro definida pelas partes tenha o potencial de neutralizar plenamente os efeitos adversos causados pelos eventos desequilibrantes. Cuida-se de entendimento consolidado, por exemplo, pela PGE/SP, no âmbito do Parecer NPT nº 52/2025, para quem: "Dessa forma, para o efetivo reequilíbrio contratual, entendemos que o evento deve ser plenamente neutralizado, adotando-se as medidas próprias para que, em termos econômico-financeiros, o contrato fique em situação similar a que estaria em um cenário de execução normal". A PGE/SP assevera, ainda, que "a compensação à qual se presta o reequilíbrio contratual visa à neutralização dos impactos econômico-financeiros gerados ao fluxo de caixa da Concessionária, decorrentes do evento que lhe gerou dispêndios, e cujo risco não lhe foi atribuído".

Ainda neste quadrante, é de se asseverar que a implementação das formas de reequilíbrio predicará um ato consensualmente produzido pelas partes. Isso porque, a despeito da vetusta concepção de acordo com a qual incumbiria ao Poder Concedente a prerrogativa de definir, unilateralmente, as formas de revisão dos contratos administrativos, a consensualidade passou a constituir vetor central do Direito Administrativo contemporâneo, especialmente diante

do reconhecimento de que toda relação contratual pressupõe, para sua adequada sustentabilidade, a cooperação entre as partes. Assim é que, como destaca a doutrina especializada (Schwind, 2025), ainda que boa parte dos contratos disponha que a definição da forma de reequilíbrio envolve uma decisão discricionária do poder concedente, "não poderão ser ignorados os influxos da consensualidade que caracterizam as relações público-privadas na atualidade. Em ambiente contratual, a consensualidade se intensifica, ainda mais em contratos incompletos como os de concessão". Motivo pelo qual, não tendo o Contrato estabelecido especificamente formas de recomposição para cada uma das hipóteses de desequilíbrio econômico-financeiro, o tema deve ser objeto de negociação entre a Requerente e a estatal concedente.

Para além disso, destaca-se, por relevante, que, em determinadas hipóteses, uma medida excluirá a outra, mas será plenamente possível a combinação de diferentes formas de reequilíbrio, de modo a se alcançar a modelagem mais adequada ao caso concreto. Esse é o entendimento, por exemplo, de Rafael Roque Garofano (2016), para quem, em cenários de desequilíbrio contratual, "não se deve descartar a possibilidade de combinação de duas ou mais modalidades. Seria perfeitamente possível, nesse sentido, a cumulação das medidas compensatórias, sem que tal conjugação pudesse despertar maiores questionamentos sob o ponto de vista da juridicidade".

A primeira forma é a consagrada no art. 9°, §2°, da Lei n° 8.987/1995 segundo o qual "os contratos poderão prever mecanismos de revisão das tarifas, a fim de manter-se o equilíbrio econômico-financeiro". Cuida-se, pois, da forma primeira de remuneração do concessionário.

O §2° do dispositivo prescreve, inclusive, que "o reequilíbrio econômico-financeiro será implementado, preferencialmente, por meio de alteração na remuneração do contrato ou de ajuste tarifário, conforme o caso, sendo que formas alternativas apenas poderão ser adotadas pela Administração com a concordância da contratada, observados, em todos os casos, os termos do contrato administrativo".

O dispositivo, a nosso ver, é atécnico e impertinente. Atécnico, porque não cabe à lei indicar métodos preferenciais de reequilíbrio econômico-financeiro. Cuida-se de matéria contratual, nos termos do que dispõe o art. 10° da Lei 8.987/1995, segundo o qual "sempre que forem atendidas as condições do contrato, considera-se mantido seu equilíbrio econômico-financeiro". Cuida-se, pois, de matéria reservada à Administração, à qual os outros poderes devem deferência. Impertinente, pois, ao privilegiar o incremento de remuneração como forma de reequilíbrio primária, desconsidera que os usuários são sensíveis ao preço da tarifa, o que pode importar na produção de novos desequilíbrios (por perda de demanda), bem como em violações à modicidade e à política tarifária. De fato, "onde os aumentos de tarifas estão sujeitos a um regime regulatório abrangente ou onde tais medidas implicariam um alto risco político, nem sempre pode ser possível alcançar um aumento, mesmo que justificável sob o Contrato de PPP. Neste caso, a Autoridade Contratante teria que efetuar a compensação devida por algum outro meio" (Banco Mundial, 2019).

O pagamento de indenização direta às concessionárias é raridade, em razão

das limitações orçamentárias, mas conta com alguns precedentes importantes. Cite-se, como exemplo, as análises empreendidas pela Agência Reguladora de Serviços Públicos Concedidos de Transportes Aquaviários, Ferroviários e Metroviários e de Rodovias do Estado do Rio de Janeiro (AGETRANSP) acerca dos desequilíbrios enfrentados pela MetrôRio com a pandemia. No âmbito do processo regulatório nº SEI-220008/000598/2020, em que se analisou pleito da Concessionária de endereçamento das perdas financeiras decorrentes da pandemia, a AGETRANSP reconheceu a "responsabilidade do Poder Concedente em arcar com a integralidade do valor nominal apurado pela CAPET em sua Nota Técnica n° 09/2022 a título de *break even* operacional do sistema de transporte metroviário para o período de janeiro a dezembro de 2021, no importe nominal de valor nominal de R$ 256.580.033,97 milhões de reais (duzentos e cinquenta e seis milhões, quinhentos e oitenta mil, trinta e três reais e noventa e sete centavos), os quais, em termos reais, correspondem ao valor de R$ 273.082.551,57 (duzentos e setenta e três milhões, oitenta e dois mil, quinhentos e cinquenta e um reais e cinquenta e sete centavos)".

Assim, em sua deliberação conclusiva, a AGETRANSP decidiu por "recomendar que o Poder Concedente promova, com a urgência que se impõe, a abertura de canal negocial com a Concessionária visando ajustes com relação à percepção do valor referido no item i deste voto, corrigidos pelo IPCA, conforme indicado na Nota Técnica CAPET n° 09/2022".

A redução das parcelas devidas ao Poder Concedente, como forma de reequilíbrio econômico-financeiro, a exemplo da outorga, não é uma novidade no regime jurídico das concessões. Cite-se, a título de *benchmark*, o art. 64, §º 12, I, da Lei nº 14.273/2021, que estabeleceu o marco legal das ferrovias, de acordo com o qual a recomposição do equilíbrio econômico-financeiro pode ser efetivada mediante "a redução do valor da outorga".

No setor de aeroportos, a redução do valor da outorga variável também foi utilizada como mecanismo de reequilíbrio econômico-financeiro durante o advento da pandemia da Covid-19. Como é usual nos contratos de exploração de infraestruturas aeroportuárias, as concessionárias se obrigam a pagar um valor de outorga fixa, bem como uma "contribuição variável", que corresponde, em regra, a 5% da totalidade da receita bruta da concessionária. Acontece que o setor aéreo foi o mais atingido pela pandemia. Para tentar minimizar seus efeitos, foi editada a Medida Provisória nº 925/2020 que, posteriormente, foi convertida na Lei nº 14.034/2020, por intermédio da qual foram implementadas medidas emergenciais para a aviação civil brasileira. Segundo a exposição de motivos da referida Medida Provisória, foram adotados três eixos para dar às sociedades empresárias do setor aéreo, no curto prazo, algum espaço para o gerenciamento dos seus fluxos de caixa: (i) a postergação do pagamento das tarifas de navegação aérea, o que veio a ser veiculado, pelo Decreto nº 10.284/2020; (ii) a ampliação do prazo para o reembolso dos passageiros por cancelamentos de voo; e (iii) a postergação do pagamento das contribuições devidas pelas concessionárias ao poder concedente, como contrapartida pelo direito de exploração dos aeroportos.

Nada obstante, considerando o vulto dos impactos que foram experimentos pela perda de receitas dos ativos concessionados, foram apresentados diversos pleitos de reequilíbrio

econômico-financeiro dos contratos de concessão aeroportuários, lastreados no evento Covid-19.

A redução dos encargos dos concessionários, prevista pelo dispositivo, também pode ser uma medida adequada a endereçar este reequilíbrio. Como leciona Marçal Justen Filho (2003), tal forma de reequilíbrio "poderá traduzir-se em uma vasta gama de providências, as quais dependerão da natureza e das condições concretas da outorga. Assim, poderão reduzir-se as exigências no tocante a investimentos ou postergar-se sua realização. Não há impedimento a que sejam alterados padrões de qualidade do próprio serviço". Em igual medida, Letícia Lins de Alencar (2019) assevera que "a utilização deste tipo de mecanismo é possível pelo fato de que toda e qualquer obrigação ou encargo contratual representa um custo pecuniário. Diante disso, ao inferir o *quantum* a ser reequilibrado e a grandeza de cada encargo ou obrigação em espécie, torna-se possível que elas sejam adotadas como mecanismos de manutenção ou recomposição do equilíbrio econômico-financeiro".

O manejo da variável prazo deve ser entendido como uma variável econômica da relação contratual (Freitas et al., 2019). Cuida-se de entendimento diagnosticado por Letícia Lins de Alencar (2019), para quem, "com um maior prazo para a execução do contrato, torna-se possível que o retorno esperado pelo concessionário, com a prestação dos serviços seja aumentado e, com isso, permitida a neutralização de eventuais desequilíbrios".

Como é de conhecimento convencional, o concessionário aufere retorno econômico a partir da exploração do objeto contratual. Daí porque, na hipótese de ocorrência de desequilíbrio, admite-se a possibilidade de extensão do prazo contratual, de modo a conferir tempo adicional de exploração capaz de compensar os prejuízos verificados. Nesse quadrante, devem ser consideradas as vantagens advindas da prorrogação, bem como os investimentos e custos adicionais inerentes a um período originalmente não previsto, a fim de se definir um prazo razoável que neutralize os efeitos do desequilíbrio (Schwind, 2025).

É de se destacar que a extensão do prazo contratual, para fins de reequilíbrio, prescinde de expressa previsão contratual, em razão de não se tratar de uma hipótese típica de extensão do prazo (e.g., prorrogação ordinária e prorrogação antecipada), mas, sim, de medida extraordinária visando endereçar desequilíbrio contratual. Nesse sentido, Floriano de Azevedo Marques Neto (2015) assevera que "a extensão de prazo para fins de reequilíbrio, ademais, pode ter lugar mesmo em contratos que não prevejam prorrogação ou que a vedem, pois com ela não se confunde".

Sobre o tema, já tive a oportunidade de me manifestar (Freitas *et al*., 2019) no sentido de que a extensão do prazo contratual, para fins de reequilíbrio: (i) prescinde de autorização legal específica ou de previsão editalícia, em razão da garantia constitucional da manutenção do equilíbrio econômico-financeiro, constante do art. 37, XXI, *in fine*, da CRFB; e (ii) está totalmente desvinculada do prazo limite previsto para eventual prorrogação contratual, pois que será estipulada pelo período de tempo necessário para que tal contrato seja reequilibrado, sob o prisma dos pesos econômicos que tal evento provocou no fluxo de caixa da concessionária.

As extensões de prazo, para fins de reequilíbrio, podem ser manejadas, inclusive, quando outras modalidades de recomposição econômico-financeira não se mostrarem disponíveis às partes, seja em razão de restrições no orçamento público, seja diante da impossibilidade de reduzir obrigações contratuais indispensáveis à adequada exploração do empreendimento concedido.

A extensão de prazo, para fins de reequilíbrio, também já foi adotada pelo Estado de São Paulo, na qualidade de Poder Concedente, no cenário de concessões rodoviárias. Cite-se, por exemplo, o TAM Coletivo nº 01/2022, celebrado entre o Estado de São Paulo e as concessionárias ViaOeste, SPVias e AutoBan, o qual teve por desiderato solucionar questões referentes aos passivos regulatórios gerados ao longo dos períodos de concessão. No termo aditivo, o Poder Concedente reconheceu haver saldo a ser reequilibrado, em favor das concessionárias, adotando-se, para o caso da AutoBan, a dilação do prazo como uma das formas de reequilíbrio.

Em particular, o contrato de concessão da AutoBan teve o prazo estendido por 3.911 dias (10 anos e 261 dias), por intermédio da Cláusula 4.1, do TAM Coletivo nº 01/2022, de acordo com a qual: "o saldo remanescente de crédito regulatório em favor da AutoBan é de R$ 3.450.161.665,29 (...), sendo, por este Acordo Definitivo, reequilibrado de forma irrevogável e irretratável por meio de prorrogação do prazo do Contrato AutoBan por 3.911 dias, encerrando-se a concessão às 23h59min59s do dia 31/12/2037".

O dispositivo andou bem ao possibilitar a utilização, para fins de reequilíbrio, de "outros métodos considerados aceitáveis pelas partes, observada a legislação do setor ou de regência do contrato".

Nesse quadrante, cite-se, por exemplo, a possibilidade de alteração do objeto contratual como forma de reequilíbrio. Nesse sentido, digno de nota é o precedente da unificação do sistema metroviário do Estado do Rio de Janeiro.

Tendo inicialmente sido concebido para a exploração por duas concessionárias distintas (Linhas 1 e 2 à Concessão Metroviária do Rio de Janeiro S.A. e Linha 4 à Concessionária Rio Barra S.A.), o sistema metroviário fluminense passou, recentemente, a ser integralmente operado pela MetrôRio. A razão central foi endereçar situação excepcional envolvendo o reconhecimento de ilicitude da modelagem que se estabeleceu na concessão da Linha 4, bem como a necessidade de implementação de nova estação de metrô, a Estação da Gávea, a ser assumida pela nova concessionária de todo o sistema.

É dizer, o escopo do contrato operado pela MetrôRio foi ampliado, o que possibilitou que tal concessionária assumisse a linha metroviária até então operada por outro parceiro privado, além de ter assumido vultosos novos investimentos a serem realizados com a construção da Estação da Gávea.

Dito em outros termos, é possível que o objeto de um contrato administrativo seja alterado ao longo do seu curso, inclusive para fins de recompor eventual desequilíbrio econômico-financeiro. A medida em nada afronta, necessariamente, o princípio licitatório, tampouco viola o cerne da relação contratual, porquanto o incremento do escopo contratual terá pertinência com o núcleo do objeto prestacional inicialmente contratado.

Daí se poder concluir esse item no sentido de que nem a lei nem sua futura regulamentação poderão engessar a

forma por meio da qual o reequilíbrio decorrente da Reforma Tributária será implementado. Caberá, pois, a cada entidade administrativa, à luz de cada módulo concessório e das suas realidades econômico-financeiras que lhe subjazem, manejar a forma de reequilíbrio mais adequada a neutralizar os impactos da Reforma.

6. SISTEMA DE GOVERNANÇA REGULATÓRIA DOS PLEITOS DE REEQUILÍBRIO DECORRENTES DA REFORMA TRIBUTÁRIA E SUA REGULAMENTAÇÃO

Diante do exposto, neste item final, proponho um sistema de governança regulatória que julgo poderia produzir eficiências na procedimentalização e gestão dos pleitos de reequilíbrio apresentados em decorrência da Reforma Tributária.

O primeiro deles seria a emissão de circulares (normativos), disciplinando a padronização dos pleitos e seu regime procedimental. A instalação de uma espécie, de balcão único de renegociações de reequilíbrio, que tem por função, como nos ensina a OCDE (2020), "como uma forma de varrer a burocracia desnecessária e criar uma interface simplificada e fácil de usar entre o governo, os cidadãos e as empresas. Os balcões únicos surgiram como uma forma de os governos prestarem melhores serviços e melhorarem a entrega regulatória. Os Princípios de Melhores Práticas da OCDE para Política Regulatória: Balcões Únicos para Cidadãos e Empresas oferecem um conjunto de considerações práticas para a concepção, operação e revisão desses balcões únicos, cobrindo uma ampla gama de ferramentas e arranjos institucionais".

Essa padronização, de acordo com as melhores práticas internacionais de alterações legislativas (*Change of Law*), deve seguir um procedimento formal, detalhado e lastreado na mitigação dos riscos, assim sumarizado: (i) os concessionários deverão apresentar pleitos detalhados, em prazos pré-estabelecidos; (ii) o pleito deve ser detalhado, contendo, dentre outros pontos, o impacto da alteração no projeto, bem como as mudanças necessárias para a neutralização dos impactos da reforma; (iii) a necessidade de alívios de cumprimento de obrigações e as estimativas exatas do desequilíbrio econômico-financeiro experimentado; e (iv) a forma de reequilíbrio sugerida para neutralizar os impactos da Reforma Tributária (Banco Mundial, 2007).

Nesse quadrante, as entidades poderão, ainda, padronizar planilhas-padrão, a serem manejadas pelos consultores financeiros do ativo, bem como o rito procedimental que será observado pelo pleito. Para além disso, como defendido neste ensaio, deve ser expedida orientação segundo a qual o concessionário terá de demonstrar o "impacto líquido efetivo", e não o valor da alteração nominal do tributo. É dizer, a estrutura de custos antes e depois da reforma, a segregação entre fase de obra/operação, os tributos substituídos, os créditos IBS/CBS, os efeitos transitórios, a base de incidência por tipo de receita/custo e o campo de conciliação contábil-fiscal. Isto porque, como preceitua o Banco Mundial (2019) "não há distinção entre mudanças gerais e discriminatórias (embora as mudanças na legislação tributária, via de regra, teriam que ser discriminatórias para se qualificarem ao reequilíbrio)".

Para além disso, tal normatização deverá estabelecer critérios e janelas mínimas para apuração dos desequilíbrios dos marcos legais de transição, de modo que sejam separados os impactos na fase pré-IBS/CBS, na convivência de tributos antigos e novos, e na fase pós-transição plena. O ideal é a possibilidade de apuração por ciclos tarifários, em sede de Revisões Tarifárias ou em outros momentos contratuais pré-determinados.

Em razão da elevada assimetria de informações e da cambialidade dos efeitos da Reforma Tributária nos módulos concessórios, será alvissareira a instituição de auditor independente, nomeado pelas partes, que possa avaliar os aspectos econômico-financeiros apresentados pelos concessionários, bem como seus impactos naquele módulo concessório. Após o que, claro, o tema deverá ser avaliado pelo órgão jurídico de cada entidade, com o desiderato de avaliar os aspectos jurídicos do pleito.

Ademais disso, a regulamentação deverá estabelecer prazos específicos para cada ato. Nada obstante, mais relevante que isso, deve-se fixar prazos próprios para o pronunciamento para entidades reguladoras. De fato, o manejo do silêncio administrativo, com natureza constitutiva, serviria ao propósito de interditar omissões administrativas protelatórias. Cuida-se de previsão alvissareira, de acordo com melhores práticas internacionais de Concessões e PPPs, as quais indicam que "se qualquer rascunho ou informação revisada, desenho ou manual não for devolvido pelo Representante do Poder Concedente no prazo de 30 dias de sua submissão, será considerado como tendo sido devolvido marcado como 'revisado sem comentários" (Banco Mundial, 2008).

A regulação dos reequilíbrios cautelares é mandatória, como visto no decorrer deste ensaio. Sob os aspectos de governança regulatória, a normatização deverá resguardar que a cautela: (i) garanta a fluidez e a sustentabilidade econômica do ativo; (ii) que excessos sejam compensados ao final do procedimento de reequilíbrio principal.

Também sugiro que a normatização interdite cobranças em duplicidade e oportunistas, por intermédio de outros expedientes, como revisões tarifárias, arbitragens, dentre outras. Nesse sentido, de acordo com o Banco Mundial (2019) "se a Autoridade Contratante aceitar alguma responsabilidade sob o Contrato de PPP, os custos elegíveis, perdas e outras consequências financeiras (tais como aumento de custos) devem ser claramente definidos e limitados a perdas diretas (tal definição provavelmente também se aplicará a outras disposições no Contrato de PPP) e não deve haver pagamento em dobro (double-counting) em relação às responsabilidades da Autoridade Contratante".

Na mesma direção, na Índia, país que experimentou reforma congênere à brasileira, em razão da ausência de regras claras a propósito do adequado procedimento de reequilíbrio, reportou-se que "sendo os serviços de transmissão ou distribuição de eletricidade isentos sob a lei do GST, as empresas de geração de energia continuariam a ter os impostos indiretos como um fator de custo significativo. Tais empresas podem, em última análise, repassar esse fardo aos consumidores sob a cláusula de 'mudança na lei' nos contratos de compra de energia (PPA)" (PwC, 2019).

Diante do que se reforçou a necessidade de um regramento claro e específico, já

que “as disposições antilucro indevido exigem o repasse do benefício fiscal devido ao GST aos clientes, por meio de reduções de preços. [...] Embora os regulamentos busquem impedir que as entidades obtenham lucros excessivos em função da implementação do GST, uma disposição antilucro indevido abrangente sob a lei do GST, sem orientações claras ou regras explícitas, levou a uma ambiguidade considerável” (PwC, 2019).

Um ponto essencial é a revisão experimental e constante dos regulamentos, de acordo com a experiência amealhada durante a implementação da reforma. Nesse sentido, como recomenda a OCDE (2025) “a revisão de regras e o desenvolvimento de regulamentações adaptativas, ágeis e baseadas em resultados permitem uma evolução natural à medida que as tecnologias continuam a progredir, os comportamentos individuais mudam e novas evidências científicas emergem”. A ossificação normativa seria a antítese do espírito da Reforma Tributária, considerando seus largos períodos de transição, bem como a formação de múltiplos reequilíbrios durante a sua incidência.

7. CONCLUSÃO

Diante do exposto, conclui-se que a Reforma Tributária não instalou, *per se*, um direito ao reequilíbrio, mas sim o direito à instauração de um processo de “ajuste” contratual e de renegociação experimental de reequilíbrio. Para obter o deferimento do pleito, o concessionário precisará demonstrar que há um Delta capaz de reduzir a TIR e o VPL do projeto. Essa demonstração exige a contraposição do Fluxo de Caixa Original, lastreado na carga tributária anterior, com a nova realidade, descontando-se o valor da alíquota incremental, os creditamentos tributários do novo regime, a extinção de isenções fiscais e a viabilidade de repasse dessa majoração a terceiros. Afinal, os impactos no equilíbrio econômico-financeiro nos contratos de concessão serão experimentados em uma miríade de aspectos econômicos e financeiros, os quais poderão merecer uma ampla renegociação do contrato de concessão.

Sob outra ótica, o art. 375 do novel diploma disciplina o reequilíbrio reverso, materializado caso o referido Delta represente um valor adicionado positivo ao concessionário. A previsão de "revisão de ofício" denota a competência do Poder Concedente para instaurar o procedimento, sem, contudo, tornar despiciendo o processo administrativo, sob pena de inconstitucionalidade por violação aos princípios do devido processo legal, do contraditório e da ampla defesa. Paralelamente, o art. 376 inova ao estabelecer o reequilíbrio cautelar, providência plenamente compatível com o ordenamento jurídico, encontrando guarida no Código de Processo Civil (art. 301), na Lei nº 9.784/1999 (art. 45) e na LINDB (art. 20). A regulamentação desse instituto poderá orientar-se pela constituição de um crédito em favor da concessionária, mediante análise preliminar do direito e do perigo da demora. Seu deferimento mostra-se imperioso em situações emergenciais, devendo o pleito ser parcial e a medida,

reversível. Cumpre registrar, ainda, que a eventual ausência de regulamentação não interditará a apresentação de pleitos, por se tratar de um direito com assento constitucional e legal.

No que diz respeito à neutralização dos impactos, o art. 376, V, elenca as formas de reequilíbrio admissíveis, sendo imperativo que o método escolhido detenha o real potencial de sanar os eventos desequilibrantes. Tal implementação predicará de um ato consensualmente produzido, haja vista que a cooperação substituiu a vetusta concepção de definição unilateral pelo Poder Concedente. Contudo, a prescrição do §2º do mesmo dispositivo revela-se atécnica e impertinente. É atécnica porque não cabe à lei indicar métodos preferenciais para matéria de cunho contratual (art. 10 da Lei 8.987/1995), a qual é reservada à Administração. E é impertinente por desconsiderar a sensibilidade dos usuários ao preço da tarifa, o que pode gerar novos desequilíbrios por perda de demanda e violações à modicidade tarifária, exigindo que a compensação se dê por outros meios em cenários de regulação abrangente ou alto risco político.

Para conferir segurança jurídica a esse cenário, proponho a adoção de sólidos mecanismos de governança regulatória. O primeiro passo seria a emissão de circulares para padronizar os pleitos, culminando na instalação de um "balcão único" de renegociações voltado à proscrição da burocracia desnecessária. Alinhada às melhores práticas internacionais de *Change of Law*, essa padronização deve exigir pleitos detalhados, com prazos pré-estabelecidos, estimativas exatas do desequilíbrio, necessidades de alívio de obrigações e propostas de neutralização. As entidades poderão disponibilizar planilhas-padrão e orientar a demonstração do "impacto líquido efetivo", segregando as fases do projeto, os tributos substituídos, os créditos de IBS/CBS, os efeitos transitórios e os campos de conciliação contábil-fiscal, em vez de focar na simples alteração nominal do tributo.

Por fim, a normatização deverá fixar critérios e janelas mínimas para apuração nos marcos legais de transição, preferencialmente por ciclos tarifários. Dada a elevada assimetria de informações e a cambialidade dos efeitos nos módulos concessórios, será alvissareira a nomeação de auditor independente pelas partes para avaliar os aspectos econômico-financeiros, seguida de criteriosa análise jurídica. É necessário, ainda, estabelecer prazos específicos para o pronunciamento das agências reguladoras – servindo o silêncio administrativo, com natureza constitutiva, para interditar omissões protelatórias – e vedar cobranças oportunistas em duplicidade. Acima de tudo, a regulamentação demandará uma revisão experimental e constante, uma vez que a ossificação normativa seria a exata antítese do espírito da Reforma Tributária, considerando seus largos períodos de transição, bem como a formação de múltiplos reequilíbrios.

BIBLIOGRAFIA

ALENCAR, Letícia Lins de. Equilíbrio na concessão. Belo Horizonte: Fórum, 2019.

AGETRANSP. Deliberação AGETRANSP CD n. 1.302/2023. Relator: Conselheiro Murilo Leal. Rio de Janeiro, 28 mar. 2023.

CÂMARA, Jacintho Arruda; GALLACCI, Fernando Bernardi. Para que serve a reversão de bens? Revista de Direito Público da Economia, ano 20, n. 80, p. 89-109, 2022.

FREITAS, Rafael Véras de. Equilíbrios econômico-financeiros das concessões. 1. ed. Belo Horizonte: Fórum, 2023.

_____; RIBEIRO, Leonardo Coelho. O prazo como elemento da economia contratual das concessões: as espécies de "prorrogação". In: MOREIRA, Egon Bockmann (coord.). Tratado do equilíbrio econômico-financeiro: contratos administrativos, concessões, parcerias público-privadas, taxa interna de retorno, prorrogação antecipada e relicitação. 2. ed. Belo Horizonte: Fórum, 2019. p. 371-388.

GAROFANO, Rafael Roque. Concorrência desleal e o equilíbrio econômico-financeiro das concessões de transporte. Revista Brasileira de Infraestrutura - RBINF, n. 9, 2016.

GASIOLA, Gustavo Gil; MARRARA, Thiago. Concessão de rodovia: análise crítica da prática contratual brasileira. Revista de Direito Público da Economia, Belo Horizonte, a. 19, n. 52, p. 147-172, out./dez. 2015.

GLOBAL INFRASTRUCTURE HUB. PPP Risk Allocation Tool. 2019 edition. Sydney: Global Infrastructure Hub, 2019.

_____. PPP Risk Allocation Tool 2019 Edition – Transport. [S. l.]: Global Infrastructure Hub, 2019. Disponível em: https://cdn.gihub.org/umbraco/media/3017/gih_rat_transport_art_web.pdf. Acesso em: 23/03/2026.

HARB, Karina Houat. A revisão na concessão comum de serviço público. São Paulo: Malheiros, 2012.

INTERNATIONAL INSTITUTE FOR SUSTAINABLE DEVELOPMENT. Risk Allocation in Public-Private Partnerships: maximizing value for money. Genebra: IISD, 2015. Disponível em: https://www.iisd.org/system/files/publications/sharing-risk-revenues-from-ppp-discussion-paper.pdf. Acesso em: 23/03/2026.

JUSTEN FILHO, Marçal. Comentários à Lei de Licitações e Contratos Administrativos. 8. ed. São Paulo: Dialética, 2000.

_____. Art. 20 da LINDB: dever de transparência, concretude e proporcionalidade nas decisões públicas. Revista de Direito Administrativo, Rio de Janeiro, edição especial: Direito Público na Lei de Introdução às Normas de Direito Brasileiro – LINDB (Lei n. 13.655/2018), p. 13-41, nov. 2018.

_____. Teoria geral das concessões de serviço público. São Paulo: Dialética, 2003.

LITMAN, Todd. Transport elasticities: impacts on travel behaviour: understanding transport demand to support sustainable travel behaviour. 1. ed. Eschborn: GIZ, 2013. (Sustainable Urban Transport Technical Document, 11).

MARQUES NETO, Floriano de Azevedo. Concessões. Belo Horizonte: Fórum, 2015.

_____. Contrato administrativo. Majoração de CPMF e COFINS e reequilíbrio econômico.

Interpretação do âmbito temporal do dever de reajuste face aos fundamentos da proteção da equação econômico-financeira dos contratos administrativos. Fórum Administrativo - FA, ano 20, n. 20, out. 2002. [dados de paginação incompletos]

_____; FREITAS, Rafael Véras de. Comentários à Lei n. 13.655/2018. Belo Horizonte: Fórum, [s. d.]. [ano não informado]

OCDE. Recommendation of the Council on Principles for Public Governance of Public-Private Partnerships. Paris: OCDE, 2012. Disponível em: https://www.oecd.org/governance/oecd-recommendation-public-privatepartnerships.htm. Acesso em: 23/03/2026.

OLIVEIRA, André Luiz Pereira de. Tutela de urgência e efetividade no processo administrativo antitruste brasileiro. Artigo vencedor do III Prêmio de Monografias da Secretaria de Acompanhamento Econômico (SEAE), 2008. Disponível em: https://ssl4799.websiteseguro.com/swge5/seg/cd2009/PDF/IC2009-0122.pdf. Acesso em: 23/03/2026.

OLIVEIRA, Antônio Flávio de. Comentários à Lei de Licitações e Contratações Públicas (art. 65). Fórum de Contratação e Gestão Pública - FCGP, Belo Horizonte, ano 14, n. 163, p. 139-150, jul. 2015.

ORGANISATION FOR ECONOMIC CO-OPERATION AND DEVELOPMENT. One-Stop Shops for Citizens and Business. Paris: OECD Publishing, 2020. (OECD Best Practice Principles for Regulatory Policy).

PGE/SP. Processo n. SPI-EXP-2023/00355. Parecer n. NPT 77/2023. Procurador: Caio César Alves Ferreira Ramos. São Paulo, 16 maio 2023.

PRICEWATERHOUSECOOPERS. Impact of GST: Infrastructure. Índia: PwC, jan. 2019.

PROCURADORIA-GERAL DO ESTADO DO RIO DE JANEIRO. Parecer Conjunto ARCY/FDCB/FAG/LCP n. 01/2025. Procuradores: André Rodrigues Cyrino, Felipe Derbli C. Baptista, Flávio Amaral Garcia e Luiz Carlos Penner Rodrigues da Costa. Rio de Janeiro, 2025.

SCHWIND, Rafael Wallbach. Formas heterodoxas de reequilíbrio econômico-financeiro, definição do mecanismo aplicável e a questão do tempo da recomposição. In: JUSTEN, Monica Spezia; PEREIRA, Cesar; JUSTEN NETO, Marçal; JUSTEN, Lucas Spezia (coord.). Uma visão humanista do Direito: homenagem ao Professor Marçal Justen Filho. v. 3. Belo Horizonte: Fórum, 2025. p. 499-524.

SHAPIRO, David; MACDONALD, Daniel; GREENLAW, Steven A. Principles of microeconomics 3e. Houston: OpenStax, Rice University, 2022.

SOLIANO, Vitor. Concessão de infraestrutura e o custo de capital. In: CONTI, José Maurício; MARRARA, Thiago; IOCKEN, Sabrina Nunes; DAL POZZO, Augusto Neves. Direito da infraestrutura: aspectos financeiros e administrativos. São Paulo: Editora Foco, 2025. p. 218.

TCU. Acórdão n. 2.107/2003 - Primeira Câmara. Relator: Min. Walton Alencar Rodrigues. Sessão de 16 set. 2003.

TUROLLA, Frederico A. Reforma tributária e os contratos de concessões e PPPs: avaliação econômica dos impactos da reforma tributária sobre contratos. São Paulo: Pezco Economics; PSP Hub, 2024.

WORLD BANK GROUP. Guidance on PPP Contractual Provisions. 2019 edition. Washington, DC: World Bank, 2019.

_____. Public-Private Partnership in Infrastructure Resource Center (PPPIRC): Change of Law - Checklist and Sample Wording. [S. l.]: World Bank Group, 2007.

_____; PPIAF. PPP in Infrastructure Resource Center for Contracts, Laws and Regulations (PPPIRC): Sample Road Concession Agreement. Washington, DC: World Bank, 2008.

ARTICLE 1

IMPACTS OF BRAZIL'S TAX REFORM ON TRANSPORT CONCESSION AGREEMENTS

Rafael Véras de Freitas
UFF/FGV-RJ

RESUMO

O presente ensaio tem por objetivo investigar os impactos da Reforma Tributária no equilíbrio econômico-financeiro dos contratos de concessão de transportes e a natureza do processo de ajuste contratual instaurado pela legislação. Pretende-se analisar a sistemática de apuração material do impacto líquido efetivo sobre os investimentos e a operação (CAPEX e OPEX) dos ativos logísticos, bem como examinar a disciplina e a aplicabilidade dos novos institutos do reequilíbrio reverso e do reequilíbrio cautelar para a continuidade da prestação desses serviços públicos. O trabalho objetiva, ainda, avaliar criticamente a imposição legal de métodos preferenciais para a recomposição dos contratos, à luz do princípio da consensualidade e da sensibilidade tarifária dos usuários, considerando a alta elasticidade da demanda e o risco de migração para modais concorrentes. Por fim, busca-se propor mecanismos de governança regulatória para a gestão administrativa dos pleitos perante as agências de transportes, baseados nas melhores práticas internacionais de *Change of Law*, de modo a afastar a burocracia e a ossificação normativa em face dos longos períodos de transição da Reforma.

Palavras-chave: Reforma Tributária; contratos de concessão; reequilíbrio econômico-financeiro.

ABSTRACT

This paper aims to investigate the impacts of the Tax Reform on the economic and financial equilibrium of transport concession agreements and the nature of the contractual adjustment process established by the legislation. It intends to analyze the material assessment system of the effective net impact on the investments and operation (CAPEX and OPEX) of logistical assets, as well as to examine the rules and applicability of the new mechanisms of reverse rebalancing and precautionary rebalancing for the continuity of the provision of these public services. The work also aims to critically evaluate the legal imposition of preferred methods for contract recomposition, in light of the principle of consensus and users' tariff sensitivity, considering the high demand elasticity and the risk of migration to competing transport modes. Finally, it seeks to propose regulatory governance mechanisms for the administrative management of claims before transport agencies, based on international best practices for *Change of Law*, in order to prevent bureaucracy and regulatory ossification in the face of the Reform's long transition periods.

Keywords: Tax Reform; Concession Agreements; Economic and Financial Rebalancing.

1. INTRODUCTION

In recent years, concession agreements have been impacted by massive events in Brazil – two economic crises (2008 and 2014), a pandemic (2020-2022) and wars around the world, which directly impact input costs. Not foreseen by contract signatories, these events were not included in their risk matrixes. The economic and financial balance crisis that assailed Brazil's concession agreements shattered the belief that these risk matrixes were bastions of stability for concession modules, underpinning their economic and financial sustainability. These mechanistic and ergodic rebalancing canons were flawed. Brazilians were aware of this state of affairs, noting that renegotiation became part of an experimental rebalancing regime, in situations rated as uncertain (Freitas, 2023).

However, Brazil is now facing a widely known challenge: the Tax Reform ushered in by Constitutional Amendment Nº 132/2023 and Complementary Law Nº 214/2025. Perhaps the most comprehensive consumption tax reform in Brazilian history: it bids farewell to levies such as the Social Integration Program (PIS) and the Social Security Financing Levy (COFINS), as well as the State Goods and Services Circulation Tax (ICMS) and Service Tax (ISS), replacing them with a State/Municipal Goods and Services Tax (IBS) and a Federal Goods and Services Tax (CBS), constituting a two-tier Value-Added Tax (VAT).

So what about concessions? It's quite simple: in its Paragraph 3, Article 9 of Law Nº 8,987/1995 states that "other than income taxes, the introduction, alteration or elimination of any taxes or legal charges after the presentation of the bid, and when the impact thereof is proven, shall result in an upward or downward tariff review, as applicable."

In this situation, should imbalances in concession modules be calculated solely and exclusively on heavier direct tax burdens? This is the issue addressed by this paper. Its intention is thus to investigate the extent to which this Tax Reform will constitute an imbalance event, together with the ways in which the economic and financial aftershocks of this new legislation will be addressed.

To do so, this paper has selected the following path: at first, initially, it explores the contours of the Tax Reform imbalance event, moving on to its indirect effects on concession modules. Next, it interprets the rebalancing under a writ of prevention procedure that introduced this Reform, which will be very useful, as different experimental rebalancing filters will be constructed during the transition period. The fourth section analyses how the new legislation plans to rebalance concession agreements thrown into disarray by this Tax Reform. Finally, regulatory governance bids are presented for rebalancing requests submitted in response to this Tax Reform, particularly for its regulation.

2. IMBALANCE DELTA CAUSED BY TAX REFORM AND EXPERIMENTAL RENEGOTIATION PROCESSES

According to international best practices for concessions and PPPs, legislative change risks are accepted by grantor authorities, as concession awardees sign up to provide projects within known legal contexts, with limited ways of offsetting adverse consequences arising from unexpected legislative changes (GI Hub, 2019).

In Brazil, initial reactions to this Tax Reform focus on the application of Article 9, Paragraph 3, of Law Nº 8,987/1995. This regulatory provision ushers in an *ex lege* risk that was previously assigned to the government. This means that, if a new tax burden influences a commercial bid at the time of the tender, the concession holder will be entitled to the economic and financial rebalancing of its contract, compliant with the provisions of Article 37, XXI, *in fine*, of Brazil's 1988 Constitution.

In fact, the deployment of taxation powers is one of the most salient examples of *factum principis* (Oliveira, 2015). As well noted by Marçal Justen Filho (2000), imposing taxes that specifically burden compliance with contract provisions disrupts their economic and financial balance, requiring a direct link between the tax and the provision. Similarly, Floriano de Azevedo Marques Neto (2002) points out that wielding political power in order to exercise tax powers is clearly a case of *factum principis*.

It should be noted that the "risk of the exercise of taxation power", which is a prerogative of the government authority, is a *priori* assigned by law to the Grantor Authority. Nothing could be more aligned with the rationale guiding concession agreement risk distribution, whereby the economic and financial effects of events occurring in the course of their execution must be borne by the party that is better able to prevent their occurrence or absorb them at a lower cost (World Bank, 2015).

Does this resolve the matter? Sceptical, I prefer to examine the legislation. Article 374 of Complementary Law Nº 214/2025 states that "contracts in place at the entry into effect of this Complementary Law entered into by the direct or indirect civil service at the Federal level, States, the Federal District and Municipalities, including public concessions, shall be adjusted to ensure the reestablishment of the economic and financial balance thereof due to the changes in the effective tax burden borne by the contracted party resulting from the impacts of the introduction of the IBS and CBS taxes, in cases where such imbalance is proven."

In this context, it is worth asking: will the new tax system always impact the investment (CAPEX) and operating (OPEX) costs of assets a priori? And consequently the NPV of a concession agreement? No. As shown, the regulatory law does not establish the right to rebalancing per se. Instead, it created a right to the establishment of a contractual "adjustment" process, underpinning an experimental rebalancing renegotiation (Freitas, 2023), translated into a broad-ranging "settlement of accounts."

Buttressed by the tax neutrality sought by this reform, concession holders must demonstrate that, using the Original Cash Flow and backed by the previous tax burden, deducting the incremental rate, the new regime credits, the

elimination of exemptions, and the possibilities of passing it on to third parties, the outcome should be a Delta able to lower the project's rate of return and net present value. Whether positive or negative, this Delta will define which signatories experience imbalance.

The construction of this Delta seems a touchstone for the success of new experimental rebalancing renegotiation proceedings engaged in as a result of Brazil's Tax Reform. This is because, according to Frederico Turolla (2024), the change in the tax base, from gross revenues to value added, may cause significant impacts, as these agreements were structured under the previous model.

Of course, not all contracts have their balance criteria embodied in Business Plans. Hence the need to find this Delta through the revival of a repealed Plan or the construction of a Marginal Cash Flow. The effects of these impacts will throughout the concession, being brought to present value and extending through both the transition period (2026/2033) and the definitive implementation.

Article 374, Paragraph 1, 'a', of Complementary Law Nº 214/2025 states that the effective tax burden must consider non-cumulative effects and credit calculation rules. Briefly, concession holder must prove: (i) more severe impacts on new investments (CAPEX); (ii) higher feedstock and input costs; (iii) higher operating costs for asset operation and maintenance (OPEX); and (iv) new Tax System implementation costs, for complying with either major new requirements or ancillary obligations. This item includes the preliminary delta between the tax rate and the appropriate credits.

Looking at the transition period between these two systems, a simple tax rate comparison will not be of much use. Contractors will demonstrate which credits will be used, to what extent changes in calculation bases will impact their CAPEX and OPEX, and how this settlement of accounts will affect the actual tax burden.

In turn, Article 374, §1, 'b' addresses the "possibility of passing it on to third parties." This provision is intended to prove who will be the effective economic payer liable for these new taxes: users, governments, outsourced contractors, or concession holders. In other words, regardless of who is the legal taxpayer, this provision uses the concept of the economically liable payer. Taking a highway concession as an example, if there are no adequate replacements (demand inelasticity), if a tax increase is automatically added to the tariff (without adversely affecting tariff moderation), the effects of the reform should not be included for the purposes of the experimental agreement on Tax Reform that is under discussion here.

Thus, if it is true that part of the new costs will be automatically passed on to tariffs, when possible, it is no less true that these imbalances will be borne until the end of the next tariff review period. On the other hand, outsourcing impacts to third parties hired by concession holders will be even more challenging, as this will depend on the respective bargaining power weights between concession holders and their vendors.

Article 374, Paragraph 1, 'c', addresses

compensation for the transition period impacts, in Articles 125 to 133 of the Temporary Constitutional Provisions Act (ACDT). This provision encompasses the guidelines set forth in Article 23 of the Law of Introduction to the Rules of Brazilian Law (LINDB), requiring a transition regime for new legal conditions. An intermediate balance will be sought, equalising both tax systems with partial credits and two-tier compliance.

Finally, Article 374, §1, 'd', considers eliminated tax benefits. This provision is justified, because the economic feasibility of concessions is often supported by exemptions and special regimens. All economic and financial engineering will be impacted, to an even greater extent in sensitive sectors such as street lighting, sanitation, urban mobility, and PPPs with large initial investments.

Furthermore to the formation of this Delta, it seems clear that impacts on the economic and financial balance will be experienced in a myriad of other aspects not addressed in the new legislation, but which may well be included in rebalancing requests submitted by concession holders.

3. INDIRECT IMPACTS OF BRAZIL'S TAX REFORM ON CONCESSION MODULES

In addition to direct impacts, concession modules will also be subject to indirect effects. They include Financial Indicators (such as Debt Coverage, Liquidity or Leverage Ratios), and may trigger healing events with lenders in Tripartite Agreements or impact performance obligations, generating tariff deflators. All this will incur costs that should not be ignored by regulators.

Furthermore, although some contracts assign financing risks to concession holders, the economic consequences caused by State regulatory acts are outside the original pricing, which encompassed only ordinary funding risks. According to the Global Infrastructure Hub (2019), abrupt changes triggered by Grantor Authority decisions draw risk to the State, due to financing cost effects. Vitor Soliano (2025) strengthens this logic by highlighting the close correlation between rendering the service and earning revenues (funding) to amortise paid-in capital (financing). Unilateral alterations to these assumptions under the Tax Reform mantle would thus force concession holders to invest their own capital to avoid default, a reflex effect requiring protection in experimental renegotiations.

This reform will also have direct demand-side effects. Traditionally assigned to private partners, risk prediction errors have led to insolvencies, prompting organisations such as the Global Infrastructure Hub (2016) and the International Institute for Sustainable Development (2026) to recommend efficient risk sharing, to ensure Value for Money. The studies also concluded that, although concession holders can manage certain demand-side risks (such as technological risks related to toll collection) it would not be reasonable to require private partners to have the same management capacities for risks outside their business scope, such as population growth or pandemics. In this context, a priori and uncritical assignment to concession holders of all and any demand-side risks

would result in contractual inefficiencies. Consequently, the current best practices have begun to favour demand-side risk sharing between concession holders and Grantor Authorities, especially when related to unpredictable events.

Under Brazilian law, this understanding was initially consolidated through the somewhat thoughtless transposition of the of the laws of instrumental administrative contract law theory, demand-side risks in long-term contracts should be accepted by concession holders, as they are intrinsic to concession projects and should thus be priced by private operators.

It turns out that this understanding has changed over time. Demand-side risks that were once considered clear examples of ordinary risks have received different treatment in more recent concession agreements, which provide for sharing risks between parties. But the fact is that, in addition to this demand-side risk distribution becoming a trend in infrastructure agreements, governments draw these risks when engaged in acts or omissions that influence concession project demands. Infrastructure is not installed in the sky; it does not just appear from nowhere. All its demands arise from its itinerary operating conditions and other modes of transport, as well as user locations, for the purposes of these investments.

This is precisely what will happen as a reflex effect of Brazil's Tax Reform.

When fares increase, users of other urban mobility facilities, highways and airports, may migrate to competing modes, especially in sectors with fare-sensitive elasticity (Shapiro et al., 2013). `This will consequently drive demand migration to substitute services. On the other hand, if lower fares boost demands, these external factors must be shared by the parties. Of course, demand elasticity may also have material effects on certain user segments, which may not be disregarded in the adjustment proceeding currently under analysis.

Another aspect that may affect demands is the change in taxation from place of origin to destination. With this shift in user locations, infrastructure logistics flows might alter, with direct impacts on highway concession demands, for example. Such changes require rebalancing, as they constitute a unilateral change (Article 9, Paragraph 4, of Law Nº 8,987/1995), impacting contract conditions (Article 10 of this law).

Corroborating this need for a broad-ranging review, Paragraph 2 of Article 374 of Complementary Law Nº 214/2025 addresses rebalancing applicability, "including contracts whose risk matrixes already include a provision stating that supervening tax impacts are the responsibility of the contracted party." Although the law already assigned de *facto factum principis* risks to the State, inefficient contracts regulated these matters differently. As explained by Harb (2012), the objective basis of the business lies in the conditions encompassed by prior planning. In this context, the provision acknowledges that the notable impacts of this Tax Reform would subvert this type of contract provision, even if shifted tax burden risks are transferred to concession holders.

In brief: (i) Brazil's Tax Reform consequently did not introduce a right to rebalancing per se; (ii) in this context, it initiated a right to request a contract "adjustment" proceeding that involves experimental rebalancing renegotiations; (iii) for rebalancing request approvals,

concession holders must demonstrate – through the Original Cash Flow backed by a previously specified tax burden, and deducting the incremental tax rate value, together with any tax credits resulting from the new regime, the elimination of tax exemptions, and whether or not there is a possibility of passing on this increase on to a third party – that there is a Delta able to reduce the internal rate of return and net present value of a project; and (iv) impacts on the economic and financial balance of concession agreements will encompass a myriad of economic and financial aspects, extending beyond those estimated by the Tax Reform; this includes matters related to compliance with financial indicators, as well as demand-side and financing risks, which may require broad-ranging renegotiations for concession agreements.

4. REBALANCING UNDER A WRIT OF PREVENTION DUE TO TAX REFORM

Article 375 of the new law requires an "*ex officio* review" for reestablishing balance when effective tax burden reductions are noted. This reverse rebalancing occurs when the Delta represents a positive added value for a concession holder. However, the "*ex officio* review" does not, as a term, downgrade the status of the administrative proceeding; this would be unconstitutional, reaching the principle of the right to a fair hearing and full defence. In fact, this term denotes the prerogative of the Grantor Authority to initiate the proceeding, rather than the power to unilaterally establish a regulatory credit, but without a proper examination of the actual impacts. This provision consequently requires the initiation of the same administrative proceeding, analysing aspects addressed in sub-paragraphs "a", "b", "c" and "d" of Paragraph 1 of Article 374, but which may result in an imbalance favouring the Grantor Authority.

At the same time, Article 376 allows the contracted party to request rebalancing in the course of the transition period, as set forth in Articles 125 to 133 of the Temporary Constitutional Provisions Act (ACDT). This provision offers two alternatives: filing either partial requests for each alteration, or a single request covering the entire period. The construction of multiple experimental and incremental balances (first alternative) seems to be the best option, being compatible with the reform ratio and allowing adaptation to supervening Senate Resolutions and other impacts appearing over time.

Furthermore, this regulation establishes a type of rebalancing under a writ of prevention. Paragraph 4 of Article 376 allows a provisional award of compensation, if the contracted party demonstrates significant financial impacts on implementation; Paragraph 2 establishes a 90-day deadline for final decisions.

This approach finds ample support in Brazil's legal system. The effectiveness of the protection, a pillar of the Civil Procedural Law Code (Articles 300 and 301) and the Constitution (Article 5, XXXV) inexorably applies to administrative proceedings. This is why André Luiz Pereira de Oliveira (2008) states that urgent injunctive relief is intended to provide citizens with the best responses, safeguarding rights from risks that a final decision could become untimely or useless.

In the sparse legislation, atypical writs of prevention are addressed in Article 45 of Law Nº 9,784/1999 (imminent risk) and with practical grounds in Article 20 of the Law of Introduction to the Rules of Brazilian Law (LINDB). According to Floriano de Azevedo Marques Neto (2019) and Marçal Justen Filho (2018), foreseeing the effects and contexts resulting from decisions pays tribute to state responsiveness. The protection offered by temporary restraining orders lies precisely in ex ante assessments of harmful consequences deriving from rebalancing postponements.

And time produces significant impacts. Investments by service providers constitute real "financing" of Grantor Authorities, amortised by concession revenues. Rebalancing delays are equivalent to late settlement of this financing, increasing its burden, clearly weakening its economic feasibility (Câmara et al., 2022). As warned by Rafael Wallbach Schwind (2025), delays worsen anomalous contract situations, adversely affecting investments, service quality, and project financeability. Time causes economic consequences for concession modules, to the extent that anticipating or delaying these obligations has direct impacts on concession holder remuneration.

For example, it should be mentioned that concession agreements regulated by Brazil's Land Transport Regulator (ANTT) have included provisions for a Rebalancing Increase instrument (usually called Factor A) since at least Stage III of the Federal Highway Concessions Programme (PROCROFE). A good example is Concession Agreement Tender Announcement Nº 03/2013 for the BR-070/163/MT highway, which was awarded to Nova Rota do Oeste S.A. (CNRO) as its concession holder. Clause 1.1.1, (i) of this concession agreement defines a rebalancing increase as a percentage escalation of the basic toll tariff. The purpose of this mechanism is precisely to preserve the contracted equivalence between the services rendered and the respective remuneration, due to early completion of capacity expansion work and improvements.

More recently, ANTT Resolution Nº 6,032/2023, which approved the Highway Concessions Regulation Rule 3 (RCR 3) states in its Article 96 that Factor A is applicable on early completion of obligations, provided that this is authorised in advance by the competent Superintendency. Furthermore, Articles 146 and 147 of RCR 3 establish that the ripple effects of early completion must be calculated annually in the Regular Review, re-establishing financial effects in cash flows or through indicators, which include Factor A.

Caution thus appears in ensuring the economic and financial sustainability for these projects, while also safeguarding the effectiveness of the proceedings as a whole. This is also why concession holders must make reinvestment for losses and damages related to their requests, when deemed partially or totally groundless, in terms of their merits or the extent of their effects.

These are precisely the legal grounds for the precautionary requests mentioned in Article 376 of Complementary Law Nº 214/2025. Regulation of this rebalancing under a writ of prevention within the scope of the Reform (Paragraph 3 of Article 376) may draw on recent successful regulatory experiences.

The initial cornerstone was laid by the Ministry of Infrastructure in MINFRA Edict Nº 1,166/2021, ensuring the feasibility of long-term port contracts by

allowing the suspension of performance or investment obligations through justified decisions, when faced by the probability of rights and the dangers of delays. The relevance of this Edict, including rebalancing under a writ of prevention in MINFRA Edict Nº 530/2019, is related to the possibility of the government adopting a more realistic approach to the economic and financial balance of long-term contracts. The purpose of these steps may be the full or partial suspension of contracted performance, investment, or payment obligations, as well as any other measures appropriate for ensuring of the right, and constituting cause for imposing the respective penalties, when the "investment obligations" and "performance obligations" addressed in a contract are not completed due to granting temporary injunctive relief.

Subsequently, São Paulo State issued SPI Resolution Nº 19/2023, issued by the Investment Partnerships Bureau and supported by NPT Opinion Nº 77/2023, issued by the Transport and Partnerships Unit Under the São Paulo State Prosecutor-General's Office (PGE/SP). Based on the principles of efficiency, economy, and continuity of public services, this regulation authorised writs of prevention for mitigating impacts exceeding 5% of a concession holder's gross revenues, or when threatening service continuity and solvency. Prudently, the São Paulo rule limits this rebalancing under a writ of prevention to 80% of the estimated impact, forbidding the receipt of funds before the effective imbalance occurs.

The reasons behind this regulatory act, as expressed in its "Whereas" paragraphs stem from the fact that many rebalancing requests involve extremely complex issues. Consequently, administrative proceeding analyses tend to extend definitions of amounts earmarked for economic and financial rebalancing. Together with the persistence of unbalanced contracts, this interval tends to ramp up the final contract imbalance values, while also skewing the financial indicators for public service concession holders. In this sense, the deployment of rebalancing under a writ of prevention is at the discretion of the Grantor Authority, pursuant to Article 2, I, of SPI Resolution Nº 19/2023. Rebalancing steps that may be taken under a writ of prevention purposes are presented in a non-exhaustive list in Article 2, III, of the regulatory act.

It should be noted that SPI Resolution Nº 19/2023 imposes constraints on the deployment of rebalancing under a writ of prevention. In this context, Article 3, Paragraph 4, of the regulatory act states that rebalancing under a writ of prevention is acceptable only if the imbalance event: (i) has already been acknowledged definitively by the competent entity, leaving only the measurement of its impacts; or (ii) it can be assumed, due to similarities with other imbalance events already acknowledged definitively by the competent entity in the actual agreement or other agreements in the same sector. Furthermore, rebalancing under a writ of prevention is limited to 80% of its estimated economic and financial impacts and may not lead to the receipt of funds in advance of the effective financial impacts caused by this imbalance event, pursuant to Article 6, Sole Paragraph, of SPI Resolution Nº 19/2023.

At the federal level, ANTT Regulatory Instruction Nº 33/2024 issued by Brazil's Land Transport Regulator followed a similar path, with the introduction of partial rebalancing of a precautionary

nature (for urgent matters and impacts greater than 2% of gross revenues) and evidence-based partial rebalancing (for non-controversial rights requiring complex calculations). Similar to the São Paulo legislation, the mitigating measures introduced by the ANTT are precarious and depend on mutual agreement, limited to a maximum advance of 80% of the estimated value.

This consequently leads to the conclusion that some lessons drawn from the rebalancing under a writ of prevention rules may guide its regulation within the scope of Brazil's Tax Reform, as follows: (i) rebalancing under a writ of prevention predicates the establishment of concession holder credits, as well as preliminary analyses of their rights and the dangers of delays in their implementation; (ii) approval is imperative for emergency situations, such as threats to the continuity of public services, or exorbitant increases in government debts; (iii) the provision that precautionary requests are part of the rebalancing procedure, rather than addressing its full value; (iv) the reversibility of these measures, if applicable. Moreover, it should be noted that the absence of regulation will obviously not prevent the submission of requests by concession holders. After all, this right is rooted in the Brazilian Constitution, as well as administrative procedural law and Complementary Law Nº 214/2025 itself. Nevertheless, the topic of regulatory governance of economic and financial rebalancing requests is now resumed in the final chapter of this paper.

5. REBALANCING APPROACHES RESULTING FROM BRAZIL'S TAX REFORM

Article 376, V of the Complementary Law states that the imbalance indicated by finding the Delta (as addressed in the first section) may be implemented through the following steps: (i) review of contracted amounts; (ii) financial compensation, adjustments to tariffs, fares or other amounts contractually owed to the contracted party, which encompasses funding allocations or financial counterparts; (iii) renegotiation of terms and conditions of service supplies or deliveries; (iv) increase or decrease in amounts payable to the civil service, including grant rights; (v) transfer to of costs or charges to one party that were originally assigned to the other; (vi) other methods deemed acceptable by the parties, subject to industry legislation or contract law.

Examining these aspects, the classic administrative law doctrine (Justen Filho, 2003) classifies economic and financial rebalancing options as internal or external to the agreement. The former are where "restoration of the economic-financial equation will be pursued without resorting to rights or duties unrelated to its scope." On the other hand, external factors are "steps or measures that extend beyond the boundaries of the actual concession."

These examples demonstrate rebalancing options that do not exhaust the countless legally and economically feasible mechanisms that can be used to rebalance concession agreements. Moreover, Rafael Schwind (2025) argues, in a specific analysis of rebalancing

options, that "'traditional' mechanisms sometimes fail to take existing needs into account. Hence the need to pursue 'heterodox' solutions for rebalancing solutions that, in addition to being compatible with the order, can restore economic-financial equations, while at the same time circumventing difficulties in traditional mechanisms."

The many ways of restoring the economic-financial balance are well illustrated in the lessons of Thiago Marrara and Gustavo Gil Gasiola (2015), who view concession agreements as open to whatever means are available to the Grantor Authority for rebalancing concessions, provided that these solutions foster project continuity through equitable weighting of party interests.

All these rebalancing options mean that choosing a specific way of dealing with imbalance events deriving from Brazil's Tax Reform will depend on a combination of two factors: (i) analyses of specific characteristics inherent to each awarded project, meaning that it would not be feasible, for example, to adopt a restoration approach based on "higher remuneration for the private partner" in agreements that do not remunerate concession holders through tariffs or fares; (ii) the ability of the selected rebalancing mechanism to neutralise economic and financial effects on the party that did not accept imbalance event risks. Consequently, it should be noted that it might not be appropriate to restore the balance through tweaking the duration variable under certain circumstances, such as when a concession holder needs immediate funding to mitigate Tax Reform impacts. In such cases, the concession agreement will not be financially rebalanced.

In this regard, the most important aspect is that the form(s) of economic and financial rebalancing defined by the parties can potentially offset all the adverse effects caused by the imbalance events. For example, it is the consolidated understanding of the São Paulo State Public Prosecutor-General's Office(PGE/São Paulo), as expressed in NPT Opinion Nº 52/2025, that: "Consequently, for effective contractual rebalancing, we understand that the event must be fully neutralised, adopting the appropriate measures so that, in economic and financial terms, the contract is in a situation similar to that which it would be in a normal performance context."

The PGE/SP also asserts that "compensation addressed by the contract rebalancing procedure is intended to offset economic and financial impacts on concession holder cash flows, resulting from the expenditure-generating event whose risk was not assigned thereto."

Still in this context, it should be noted that the implementation of rebalancing options will require a consensual act by the parties. This is because, despite the outdated concept that the Grantor Authority is unilaterally empowered to define the revision path for administrative contracts, consensuality has become a core vector of contemporary Administrative Law, underpinned by widespread acknowledgment that the adequate sustainability of every contractual relationship requires cooperation between its parties. Thus, as highlighted by specialised doctrine (Schwind, 2025), although most contracts state that the rebalancing options are dependent on discretionary decisions handed down by the Grantor Authority, "consensuality

influences that today shape public-private relations may not be ignored. In a contractual environment, consensuality becomes even more important, and to a greater extent for incomplete contracts such as concession agreements." This is why this issue must be subject to negotiation between the applicant and the state-owned grantor, when these agreements do not specifically establish restoration rules for each of the economic and financial imbalance hypotheses.

Furthermore, it is relevant to note that although one option may exclude another in certain cases, it will be quite possible to combine different rebalancing options, when defining the most appropriate modelling for each specific case. For example, this is the understanding of Rafael Roque Garofano (2016), for whom, in a contract imbalance context, "the possibility of combining two or more approaches should not be ruled out. It would thus be perfectly possible to stack compensatory measures, without such combinations raising further questions about their legality."

The initial approach is enshrined in Article 9, Paragraph 2, of Law Nº 8,987/1995, whereby "contracts may include tariff or fare review mechanisms, in order to uphold their economic and financial balance." Consequently, the first concession holder remuneration option is addressed.

Paragraph 2 of this provision also states that "economic and financial rebalancing will be implemented, preferably, through alterations to contract remuneration of the or tariff and fare adjustments, as applicable. Alternative approaches may be adopted by the Administration only with the agreement of the contracted party, always in compliance with the terms of the administrative contract."

This provision seems to be non-technical, while also overstepping boundaries. It is non-technical because the law is not empowered to indicate preferred economic and financial rebalancing methods. Under the terms of Article 10 of Law 8,987/1995, contract matters are dealt with on the basis of: "whenever contract conditions are met, its economic and financial balance is deemed to be maintained." This matter consequently falls under the aegis of the Civil Service, to which other branches must defer.

It thus oversteps boundaries by stressing higher remuneration as a form of primary rebalancing, ignoring the fact that users are sensitive to tariffs and fares. This may lead to further imbalances (due to shrinking demands), as well as tariff/fare policy breaches and moderate price requirements. Indeed, "where tariff or fare increases are subject to a comprehensive regulatory regime or where such measures would entail high political risks, it may not always be possible to introduce an increase, even if justifiable under the PPP Agreement. In this case, the Grantor Authority would have to provide the necessary compensation through some other means" (World Bank, 2019).

Although compensation paid directly to concession holders is rare, due to budget constraints, there are some important precedents. Good examples are analyses of imbalances faced by the Rio de Janeiro Subway (MetrôRio) during the pandemic, undertaken by the Rio de Janeiro State Public Waterway, Railway, Subway, and Highway Transport Services Concession Regulator (AGETRANSP). Under the aegis of

the Regulatory Proceeding Nº SEI-220008/000598/2020, which examined this concession holder's request to address financial losses resulting from the pandemic, AGETRANSP acknowledged the "responsibility of the Grantor Authority to bear the full face value calculated by the Economic Policy, Tariff and Fare Chamber (CAPET) in its Technical Note Nº 09/2022 as a break-even point for the subway transport system during the period between January to December 2021, in the nominal amount with a face value of BRL 256,580,033.97 reais (two hundred and fifty-six million, five hundred and eighty thousand, thirty-three reais and ninety-seven cents), which corresponds in real terms to an amount of BRL 273,082,551.57 (two hundred and seventy-three million, eighty-two thousand, five hundred and fifty-one reais and fifty-seven cents)."

Consequently, in its final decision, AGETRANSP resolved to "recommend that the Grantor Authority undertake to open a negotiation channel with the Concession holder with the necessarily urgency, seeking adjustments in perceptions of the amount mentioned in item i of this Opinion, restated by the Extended Consumer Price Index (IPCA), as indicated in CAPET Technical Note Nº 09/2022."

Reducing instalments payable to the Grantor Authority as an economic and financial rebalancing option for awards such as this is nothing new under concession law. Mentioned as a benchmark, Article 64, Paragraph 12, I, of Law Nº 14,273/2021 established the legal framework for railways, under which economic and financial balance may be restored by "reducing the amount charged for the award."

In the airport sector, the lowering the value of variable awards was also deployed as an economic and financial rebalancing mechanism f during the Covid-19 pandemic. As is usual in airport infrastructure operating agreements, concession holders are bound to pay a fixed amount for a n award, as well as a "variable contribution", which generally corresponds to 5% of the total gross revenues of the concession holder. Unsurprisingly, the airline industry was hit the hardest by the pandemic. Attempting to minimise its effects, Provisional Measure Nº 925/2020 was enacted, later converted into Law Nº 14,034/2020, through which emergency measures were implemented for Brazil's civil aviation sector. According to the presentation of grounds for this Provisional Measure, three approaches were adopted for endowing airlines with short-term breathing-space for managing their cash flows: (i) postponement of air travel fees, conveyed through Decree Nº 10,284/2020; (ii) extensions of passenger reimbursement deadlines for flight cancellations; and (iii) the postponement of amounts owed to the Grantor Authority by the concession holders for airport operation rights.

Nevertheless, considering the massive scope of the impacts resulting from lost concession asset revenues, several requests were submitted for the economic and financial rebalancing of airport concession agreements, resulting from the Covid-19 pandemic.

Reductions in concession holder fees introduced by this Provision might also be an appropriate way of handling this rebalancing procedure. As noted by Marçal Justen Filho (2003), this form of rebalancing "may be translated into

a wide range of measures, which will depend on the nature and material conditions of the award. Thus Investment requirements might thus be reduced or their implementation could be postponed. There is no impediment preventing alterations to service quality standards." Similarly, Letícia Lins de Alencar (2019) asserts that "the use of this type of mechanism is possible, due to the fact that all and any contracted obligations or fees constitute financial costs. Consequently, inferring the amount to be rebalanced and the magnitude of each fee or obligation in kind, opens up possibilities for their adoption as mechanisms for maintaining or restoring the economic and financial balance."

Duration variable management should be seen as an economic variable in contractual relationships (Freitas et al., 2019). This understanding is diagnosed by Letícia Lins de Alencar (2019), who notes that "a longer contract implementation period opens up the possibility of returns higher than expected by the concession holder through rendering services, thus offsetting any imbalances."

As is generally known, concession holders earn economic returns through building or operating assets under agreements. This is why the possibility of extending the term of a contract is permitted, should an imbalance occur, in order to provide additional operating time that could offset the resulting losses. In this context, the advantages arising from these extensions, as well as the investments and additional costs inherent to a period not originally foreseen, should be taken into consideration for defining a reasonable period that neutralises the effects of such imbalances (Schwind, 2025).

It should also be noted that extensions of contract terms for rebalancing purposes do not require specific provisions in these agreements, because this is not a typical hypothesis for extensions of their terms (e.g., regular extension and early extension). Instead, this is an extraordinary step intended to address contract imbalances. In this context, Floriano de Azevedo Marques Neto (2015) asserts that "Moreover, extension of a term for rebalancing purposes may occur even for contracts that with no extension provisions or even when prohibiting this, as it should not be confounded therewith."

On this topic, the author has already expressed his thoughts (Freitas et al., 2019) on contract term extensions for rebalancing purposes as follows: (i) no specific legal authorisation or public notice is required, due to the constitutional guarantee upholding the economic and financial balance in Article 37, XXI, *in fine*, of Brazil's 1988 Constitution; and (ii) this is completely unrelated to the deadlines established for any contract extension, as it will be stipulated for only the length of time needed to rebalance such contract, from the standpoint of the economic burdens imposed by such an event on concession holder cash flows.

For rebalancing purposes, contract term extensions may be used, even when other economic and financial restoration options are not available to the parties, due either to government budget constraints, or the impossibility of easing contracted obligations vital for the proper implementation of the awarded project.

Contract term extensions for rebalancing purposes have also been adopted by the São Paulo State, as the Grantor

Authority for highway concessions. For example, it is worth mentioning the collective modificatory addendum (TAM Coletivo Nº 01/2022) signed by São Paulo State and the ViaOeste, SPVias, and AutoBan highway concession holders, drawn up to resolve issues related to regulatory liabilities generated during their concession periods. In this addendum, the Grantor Authority acknowledged that there are negative aspects to be rebalanced for these concession holders, opting for a term extension of the AutoBan contract, as one of the rebalancing approaches.

More specifically, the term of the AutoBan concession agreement was extended by 3,911 days (10 years and 261 days), through Clause 4.1 of the TAM Coletivo Nº 01/2022 collective modificatory addendum, whereby: "the outstanding regulatory credit balance in favour of AutoBan is BRL 3,450,161,665.29 (...), being irrevocably and irreversibly rebalanced by this Definitive Agreement through extending the term of the AutoBan Agreement by 3,911 days, with the concession expiring at 11:59:59 pm on December 31, /2037."

This provision worked well, by enabling the use, for rebalancing purposes, of "other methods deemed acceptable by the parties, compliant with sector legislation or the governing law of the contract."

For instance, in this context it is worth mentioning the possibility of altering the purpose of the contract as a rebalancing option. Here, it is worth noting the precedent of the unification of the Rio de Janeiro State subway system.

Initially designed for operation by two different concession holders (Lines 1 and 2 operated by the Rio de Janeiro subway concession and Line 4 handled by the Rio Barra concession holder), the Rio de Janeiro subway system has recently been unified, now fully operated by MetrôRio. The main reason was to deal with an exceptional situation involving acknowledgment of the illegal status of the modelling used for awarding the Line 4 concession, together with the need to complete the Gávea Station, which was assigned to the new concession holder for the entire system.

In other words, the scope of the MetrôRio contract was expanded, allowing this concession holder to take over a subway line operated until then by another private partner, as well as agreeing to massive new construction investments for the Gávea Station.

In other words, the subject of an administrative contract may be altered in the course of its duration; this may include the restoration of any economic and financial imbalances. This step does not necessarily breach the tender principle; neither does it disrupt the core of a contracted relationship, as any expansion of this scope will remain pertinent to the key services initially contracted.

This consequently leads to the conclusion that neither the law nor its future regulation will be able to stifle the ways in which rebalancing resulting from the Tax Reform are implemented. It will thus be up to each administrative entity, based on each concession module and its underlying economic and financial realities, to select the most appropriate rebalancing approaches for offsetting the impacts of this Tax Reform.

6. REGULATORY GOVERNANCE SYSTEM FOR REBALANCING REQUESTS PROMPTED BY BRAZIL'S TAX REFORM AND ITS REGULATION

Aligned with the matters set forth above, this final section proposes a regulatory governance system that could streamline the proceduralisation and management of rebalancing requests submitted in response to Brazil's Tax Reform.

The first step would be to release regulatory circulars that establish request standardisation of their procedural pathways. This would set up a kind of one-stop shop for rebalancing renegotiations that would serve – as defined by the OECD (2020) – "as a way of sweeping away unnecessary paperwork, creating a simplified and easy-to-use interface between governments, citizens and companies. One-stop-shops have emerged as a way for governments to provide better services and fast-track regulatory deliveries. The OECD Best Practice Principles for Regulatory Policy: One-Stop-Shops for Citizens and Businesses offer a set of practical guidelines for the design, operation, and review of these one-stop shops, covering a wide range of institutional tools and arrangements."

Aligned with the best international change of law practices, this standardisation, must follow a formal, detailed procedural path that is based on risk mitigation, summarised as follows: (i) concession holders must submit detailed requests within pre-established deadlines; (ii) requests must be detailed and include, among other points, the impacts of changes on projects, as well as the alterations needed to offset Tax Reform impacts; (iii) the need for relief from obligation requirements, with exact estimates of the economic and financial imbalances in question; and (iv) the rebalancing option suggested for offsetting Tax Reform impacts(World Bank, 2007).

In this context, agencies may also standardise spreadsheet templates for completion by an asset's financial advisors, as well as the procedural steps that will be followed by requests. Furthermore, as explained in this paper, guidance should be issued on how concession holders must demonstrate "effective net impacts", rather than the face value of tax changes. This means describing pre- and post-Reform cost structure, distinguishing between construction and operating phases, old taxes and IBS/CBS credits, transitory effects, tax based by revenue/cost type, and the tax accounting reconciliation field. This is because, as noted by the World Bank (2019), "there is no distinction between general and discriminatory changes (although alterations to tax legislation would generally have to be discriminatory to qualify for rebalancing)."

Moreover, such standardisation should establish criteria and minimum windows for determining imbalances resulting from transitional legal frameworks, so that impacts are separated for the pre-IBS/CBS phase (when old and new taxes function in parallel), and the full post-transition phase. Ideally, calculations may be undertaken by tariff or fare cycles, within the context of tariff of fare reviews, or at other predefined moments in these agreements.

Due to severely asymmetrical information and the changeability of Tax Reform effects on concession modules, it would be appropriate for the parties to appoint independent auditors to assess the economic and financial aspects presented by concession

holders, as well as their impacts on these concession modules. After this, the issue in question must then be examined by the legal department of each entity, weighing the legal aspects of each request.

Furthermore, the regulations must set specific deadlines for statements from regulatory entities, with confirmatory administrative silence preventing procrastinatory administrative omissions. This forward-looking approach is aligned with international best practices for Concessions and PPPs, which indicate that "if any draft, revised information, drawing or manual is not returned by the Grantor Authority Representative within thirty days of its submission, it will be deemed to have been returned and marked as 'reviewed without comment' (World Bank, 2008).

The regulation of rebalancing procedures under temporary injunctive relief is mandatory, as seen in the course of this paper. From the regulatory governance standpoint, standardisation must ensure that writs of prevention: (i) ensure the fluidity and economic sustainability of these assets; and that (ii) excess amounts are offset at the end of the main rebalancing procedures.

The author also suggests that the regulations forbid opportunistic double claims through other pathways, such as tariff or fare reviews and arbitration, among others. On this topic, according to the World Bank (2019): "if the Contracting Authority accepts any liability under the PPP Agreement, the eligible costs, losses, and other financial consequences (such as higher costs) should be clearly defined and limited to direct losses (such a definition may will also apply to other provisions in the PPP Agreement) and there should be no double-counting, related to the responsibilities of the Contracting Authority."

Similarly, it was noted in India – a country that has gone through a tax reform process similar to that of Brazil – that the absence of clear rules on e appropriate rebalancing procedures meant that: "since electricity transmission or distribution services are exempt under the Goods and Services Tax (GST) Act, indirect taxes would continue to be a significant cost factor for power generation companies. These utilities may ultimately pass this burden on to consumers under the 'change in law' clause in power purchase agreements (PPAs)" (PwC, 2019).

Consequently, the need for clear and specific regulation was reinforced, as "the anti-undue profit provisions require the GST tax benefit be transferred to customers through price reductions. [...] While regulations strive to prevent entities from making excessive profits through GST implementation, a sweeping anti-gouging provision in the GST Act (that lacks clear guidance or explicit rules), has led to considerable ambiguity" (PwC, 2019).

An essential point here is the ongoing experience-based review of the regulations, steered by expertise gathered during the Tax Reform implementation stage. As recommended by the OECD (2025) "rule reviews and the development of adaptive, agile and results-based regulations drive their natural evolution, as technologies continue to progress, individual behaviours shift, and new scientific evidence emerges." Regulatory fossilisation would be the antithesis of the Tax Reform spirit, particularly in view of its lengthy transition periods, as well as multiple rebalancing procedures during the stage.

7. CONCLUSION

The situation described above leads to the conclusion that Brazil's Tax Reform does not establish a rebalancing right per se; instead, it offers the right to seek a contract "adjustment" through experimental rebalancing renegotiation. Request approval requires a concession holder to demonstrate that there is a Delta able to reduce a project's rate of return and net present value. This requires a comparison between the new reality and the Original Cash Flow, backed by the previous tax burden, deducting the higher tax rate value, tax credits under the new system, elimination of tax exemptions, and the feasibility of passing on this increase on to third parties. Finally, impacts on the economic and financial balance of the concession agreement will be measured for a myriad of economic and financial aspects, which may then warrant broad-ranging renegotiation of the concession agreement.

From a different standpoint, Article 375 of the new law describes reverse rebalancing, which will occur if the Delta in question indicates a positive added value for a concession holder. The provision covering "ex officio reviews" confirms the power of the Grantor Authority to initiate such a proceeding, although without downgrading the status of administrative proceedings, under penalty of unconstitutionality for breaching the principles of due process, the right to a fair hearing, and full defence. At the same time, Article 376 innovates through the introduction of rebalancing under a writ of prevention, a step that is fully compatible with the legal system under Brazil's Civil Procedural Law Code (Article 301); I Law Nº 9,784/1999 (Article 45); and the Law of Introduction to the Rules of Brazilian Law (LINDB) (Article 20). Regulation of this proceeding may be guided by setting up a credit for the concession holder through a preliminary analysis of the right and the danger of delay. Approval is imperative in emergency situations, so the request must be partial and the step reversible. It should also be noted that possible future absences of regulations will not prevent the submission of requests, as this right is grounded on the Brazilian constitution and domestic law.

With regard to offsetting impacts, Article 376, V lists acceptable rebalancing options. It is imperative that the selected method has real potential for remedying imbalance events. This implementation requires a consensual act, as cooperation has replaced the previous concept of unilateral definition by the Grantor Authority. However, the requirement outlined in Paragraph 2 of this provision is non-technical, and also oversteps boundaries. It is non-technical because the law is not empowered to indicate preferred methods for dealing with contractual issues (Article 10 of Law 8,987/1995), which are the sole purview of the Civil Service. It oversteps boundaries by disregarding user sensitivity to fares and tariffs, which may give rise to further imbalances caused by shrinking demands and breaches of the low-cost requirement. In turn, this could give rise to other types of compensation in contexts with complex regulation or high political risks.

Endowing this situation with legal certainty, the author proposes the adoption of solid regulatory governance mechanisms. The first step would be to issue circulars standardising requests, culminating in a "one-stop shop" for renegotiations striving to streamline unnecessary paperwork. Aligned with the best international change of law practices, this standardisation should require detailed requests, with pre-established deadlines, exact imbalance estimates, needs for relief from obligations, and proposals on offsetting the effects. Government offices should provide standard spreadsheets and guide financial statements showing "effective net impacts", separated by project phases, listing substituted taxes, new IBS/CBS credits, transitory effects, and tax accounting reconciliation fields, instead of focusing on just differences in tax values.

Finally, this standardisation should establish calculation criteria and minimum windows in the legal frameworks for this transition, preferably by tariff or fare cycles. Due to severely asymmetrical information and the changeability of Tax Reform effects on concession modules, it would be appropriate for the parties to appoint independent auditors to assess economic and financial aspects, followed by careful legal analyses.

It is also necessary to set specific deadlines for statements from regulatory agencies – with confirmatory administrative silence preventing procrastinatory omissions and opportunistic duplicate charges. Above all, regulation will require constant experimental reviews, as regulatory fossilisation would be the exact antithesis of the Tax Reform spirit, particularly in view of its lengthy transition periods, as well as multiple rebalancing procedures.

BIBLIOGRAPHY

ALENCAR, Letícia Lins de. Equilíbrio na concessão. Belo Horizonte: Fórum, 2019.

AGETRANSP. AGETRANSP CD Deliberation Nº 1.302/2023. Rapporteur: Board Member Murilo Leal. Rio de Janeiro, 28 mar. 2023.

CÂMARA, Jacintho Arruda; GALLACCI, Fernando Bernardi. Para que serve a reversão de bens? Revista de Direito Público da Economia, year 20, n. 80, p. 89-109, 2022.

FREITAS, Rafael Véras de. Equilíbrios econômico-financeiros das concessões. 1. ed. Belo Horizonte: Fórum, 2023.

_____; RIBEIRO, Leonardo Coelho. O prazo como elemento da economia contratual das concessões: as espécies de "prorrogação". In: MOREIRA, Egon Bockmann (coord.). Tratado do equilíbrio econômico-financeiro: contratos administrativos, concessões, parcerias público-privadas, taxa interna de retorno, prorrogação antecipada e relicitação. 2. ed. Belo Horizonte: Fórum, 2019. p. 371-388.

GAROFANO, Rafael Roque. Concorrência desleal e o equilíbrio econômico-financeiro das concessões de transporte. Revista Brasileira de Infraestrutura - RBINF, n. 9, 2016.

GASIOLA, Gustavo Gil; MARRARA, Thiago. Concessão de rodovia: análise crítica da prática contratual brasileira. Revista de Direito Público da Economia, Belo Horizonte, a. 19, n. 52, p. 147-172, Oct/Dec 2015.

GLOBAL INFRASTRUCTURE HUB. PPP Risk Allocation Tool. 2019 edition. Sydney: Global Infrastructure Hub, 2019.

_____. PPP Risk Allocation Tool 2019 Edition – Transport. [S. l.]: Global Infrastructure Hub, 2019. Available at: https://cdn.gihub.org/umbraco/media/3017/gih_rat_transport_art_web.pdf. Accessed on: March 23, 2026.

HARB, Karina Houat. A revisão na concessão comum de serviço público. São Paulo: Malheiros, 2012.

INTERNATIONAL INSTITUTE FOR SUSTAINABLE DEVELOPMENT. Risk Allocation in Public-Private Partnerships: maximizing value for money. Genebra: IISD, 2015. Available at: https://www.iisd.org/system/files/publications/sharing-risk-revenues-from-ppp-discussion-paper.pdf. Accessed on: March 23, 2026.

JUSTEN FILHO, Marçal. Comentários à Lei de Licitações e Contratos Administrativos. 8. ed. São Paulo: Dialética, 2000.

_____. Art. 20 da LINDB: dever de transparência, concretude e proporcionalidade nas decisões públicas. Revista de Direito Administrativo, Rio de Janeiro, edição especial: Direito Público na Lei de Introdução às Normas de Direito Brasileiro – LINDB (Lei n. 13.655/2018), p. 13-41, November 2018.

_____. Teoria geral das concessões de serviço público. São Paulo: Dialética, 2003.

LITMAN, Todd. Transport elasticities: impacts on travel behaviour: understanding transport demand to support sustainable travel behaviour. 1. ed. Eschborn: GIZ, 2013. (Sustainable Urban Transport Technical Document, 11).

MARQUES NETO, Floriano de Azevedo. Concessões. Belo Horizonte: Fórum, 2015.

_____. Contrato administrativo. Majoração de CPMF e COFINS e reequilíbrio econômico.

Interpretação do âmbito temporal do dever de reajuste face aos fundamentos da proteção da equação econômico-financeira dos contratos administrativos. Fórum Administrativo - FA, year 20, n. 20, October 2002. [incomplete pagination data]

_____; FREITAS, Rafael Véras de. Comentários à Lei n. 13.655/2018. Belo Horizonte: Fórum, [undated]. [year not stated]

OCDE. Recommendation of the Council on Principles for Public Governance of Public-Private Partnerships. Paris: OCDE, 2012. Available at: https://www.oecd.org/governance/oecd-recommendation-public-privatepartnerships.htm. Accessed on: March 23, 2026.

OLIVEIRA, André Luiz Pereira de. Tutela de urgência e efetividade no processo administrativo antitruste brasileiro. Artigo vencedor do III Prêmio de Monografias da Secretaria de Acompanhamento Econômico (SEAE), 2008. Available at: https://ssl4799.websiteseguro.com/swge5/seg/cd2009/PDF/IC2009-0122.pdf. Accessed on: March 23, 2026.

OLIVEIRA, Antônio Flávio de. Comentários à Lei de Licitações e Contratações Públicas (art. 65). Fórum de Contratação e Gestão Pública - FCGP, Belo Horizonte, ano 14, n. 163, p. 139-150, July 2015.

ORGANISATION FOR ECONOMIC CO-OPERATION AND DEVELOPMENT. One-Stop Shops for Citizens and Business. Paris: OECD Publishing, 2020. (OECD Best Practice Principles for Regulatory Policy).

PGE/SP. Processo n. SPI-EXP-2023/00355. Parecer n. NPT 77/2023. Procurador: Caio César Alves Ferreira Ramos. São Paulo, May 16, 2023.

PRICEWATERHOUSECOOPERS. Impact of GST: Infrastructure. Índia: PwC, January 2019.

PROCURADORIA-GERAL DO ESTADO DO RIO DE JANEIRO. Parecer Conjunto ARCY/FDCB/FAG/LCP n. 01/2025. Procuradores: André Rodrigues Cyrino, Felipe Derbli C. Baptista, Flávio Amaral Garcia e Luiz Carlos Penner Rodrigues da Costa. Rio de Janeiro, 2025.

SCHWIND, Rafael Wallbach. Formas heterodoxas de reequilíbrio econômico-financeiro, definição do mecanismo aplicável e a questão do tempo da recomposição. In: JUSTEN, Monica Spezia; PEREIRA, Cesar; JUSTEN NETO, Marçal; JUSTEN, Lucas Spezia (coord.). Uma visão humanista do Direito: homenagem ao Professor Marçal Justen Filho. v. 3. Belo Horizonte: Fórum, 2025. p. 499-524.

SHAPIRO, David; MACDONALD, Daniel; GREENLAW, Steven A. Principles of microeconomics 3e. Houston: OpenStax, Rice University, 2022.

SOLIANO, Vitor. Concessão de infraestrutura e o custo de capital. In: CONTI, José Maurício; MARRARA, Thiago; IOCKEN, Sabrina Nunes; DAL POZZO, Augusto Neves. Direito da infraestrutura: aspectos financeiros e administrativos. São Paulo: Editora Foco, 2025. p. 218.

TCU. Decision Nº 2.107/2003 – I Chamber. Reporting Justice: Justice Walton Alencar Rodrigues. Held On September 16, 2003.

TUROLLA, Frederico A. Reforma tributária e os contratos de concessões e PPPs: avaliação econômica dos impactos da reforma tributária sobre contratos. São Paulo: Pezco Economics; PSP Hub, 2024.

WORLD BANK GROUP. Guidance on PPP Contractual Provisions. 2019 edition. Washington, DC: World Bank, 2019.

_____. Public-Private Partnership in Infrastructure Resource Center (PPPIRC): Change of Law - Checklist and Sample Wording. [S. l.]: World Bank Group, 2007.

_____; PPIAF. PPP in Infrastructure Resource Center for Contracts, Laws and Regulations (PPPIRC): Sample Road Concession Agreement. Washington, DC: World Bank, 2008.

ARTIGO 2

O CICLO ESTRUTURAL PERVERSO DO TRANSPORTE RODOVIÁRIO DE CARGAS: EXTERNALIDADES, FALHAS DE MERCADO E EFICIÊNCIA DA MATRIZ DE TRANSPORTE DE CARGAS NO BRASIL

Luis Claudio Santana Montenegro (Neowise Consultoria), Rodrigo Tavares Paiva (Graf Consulting) e Ana Carolina Capanema Alves

RESUMO

O artigo analisa o transporte rodoviário de cargas no Brasil a partir de uma abordagem integrada entre externalidades, falhas de mercado e estrutura institucional, examinando seus efeitos sobre a formação de preços e a eficiência da matriz logística nacional. Argumenta que a predominância do modal rodoviário está associada à não internalização de custos sociais, como impactos sobre a infraestrutura, a segurança viária, o meio ambiente e as condições de trabalho, o que leva à subprecificação estrutural do frete. O estudo evidencia que a combinação entre baixa barreira de entrada, elevada fragmentação da oferta e falhas de fiscalização gera excesso de capacidade e competição baseada na transferência de custos para a sociedade. Como consequência, há impactos sistêmicos na matriz de transportes, com desincentivo à intermodalidade e redução da eficiência econômica. Por fim, o trabalho examina o papel de políticas institucionais, como o frete mínimo, e propõe uma agenda de ações voltadas à internalização de custos, ao fortalecimento da fiscalização e à promoção de um ambiente competitivo mais equilibrado, além da redução da informalidade, aprimoramento dos mecanismos de fiscalização, monitoramento e integração entre modais.

Palavras-chave: transporte rodoviário de cargas; falhas de mercado; subprecificação do frete.

ABSTRACT

The article analyzes road freight transport in Brazil through an integrated approach that combines externalities, market failures, and institutional structure, examining their effects on price formation and the efficiency of the national logistics matrix. It argues that the predominance of the road mode is associated with the non-internalization of social costs, including impacts on infrastructure, road safety, the environment, and working conditions, leading to a structural underpricing of freight rates. The study shows that the combination of low barriers to entry, high supply fragmentation, and enforcement shortcomings results in excess capacity and competition based on shifting costs to society. As a consequence, systemic impacts arise in the transport matrix, discouraging intermodality and reducing economic efficiency. Finally, the paper examines the role of institutional policies, such as minimum freight rates, and proposes a policy agenda aimed at cost internalization, strengthening enforcement, and promoting a more balanced competitive environment, as well as reducing informality and improving monitoring, enforcement mechanisms, and modal integration.

Keywords: road freight transport, market failures, freight underpricing.

1. INTRODUÇÃO

O transporte de cargas desempenha papel central na organização econômica de países de grande dimensão territorial. No Brasil, essa atividade assume relevância ainda maior em razão da extensão continental do território, da dispersão geográfica dos polos produtivos e da forte dependência da logística para a competitividade das cadeias produtivas. Nesse contexto, a eficiência da matriz de transportes constitui elemento fundamental para o desenvolvimento econômico, para a redução do chamado custo logístico nacional e para a integração territorial.

Apesar dessa importância, a matriz de transporte de cargas brasileira apresenta elevada concentração no modal rodoviário. Historicamente, o transporte por caminhões passou a responder pela maior parte da movimentação de cargas no país, assumindo papel predominante tanto em curtas quanto em longas distâncias. Essa predominância não decorre apenas de características geográficas ou produtivas, mas também de fatores estruturais e institucionais que influenciam a dinâmica de funcionamento do setor.

Nos últimos anos, diferentes estudos e diagnósticos têm apontado que o funcionamento do mercado de transporte rodoviário de cargas envolve um conjunto relevante de externalidades negativas e de falhas de mercado. Entre essas externalidades, estão custos associados à segurança viária, aos impactos sobre a saúde pública, ao desgaste da infraestrutura rodoviária, aos efeitos ambientais e a diversas ineficiências logísticas. Uma parte significativa desses custos não é plenamente internalizada pelos agentes econômicos envolvidos na prestação do serviço de transporte, sendo absorvida pela sociedade em geral ou pelo setor público.

Quando externalidades dessa natureza não são adequadamente internalizadas, o resultado pode ser a formação de preços que não refletem o custo econômico total da atividade. Em tais circunstâncias, decisões privadas de produção e consumo tendem a se afastar do nível socialmente eficiente, gerando distorções alocativas e efeitos sistêmicos sobre a organização da economia. No caso do transporte de cargas, esse fenômeno pode influenciar a escolha modal, afetar a dinâmica de investimentos em infraestrutura e contribuir para a manutenção de uma matriz logística menos eficiente do que aquela que seria observada em um ambiente de competição plenamente equilibrada entre os diferentes modais.

Além das externalidades associadas à própria operação do transporte rodoviário, aspectos institucionais e regulatórios também desempenham papel relevante na configuração desse cenário. Questões relacionadas à capacidade de fiscalização do setor, à observância das regras operacionais e à dinâmica de expansão da frota de veículos de carga interagem com as características estruturais do mercado, podendo reforçar determinadas distorções econômicas e concorrenciais.

Diante desse contexto, torna-se relevante analisar, de forma integrada, os diferentes fatores que influenciam o funcionamento do transporte rodoviário de cargas no Brasil. Mais do que examinar isoladamente determinados instrumentos regulatórios ou políticas específicas, é necessário compreender a lógica sistêmica que conecta a estrutura do mercado, as externalidades geradas pela atividade, as falhas de mercado associadas a esse ambiente e as consequências dessas dinâmicas para a matriz logística nacional.

O presente artigo tem como objetivo contribuir para essa análise. Para isso, organiza um conjunto de argumentos conceituais e evidências empíricas que permitem compreender como determinadas características estruturais do transporte rodoviário podem gerar externalidades relevantes e distorções econômicas mais amplas. Ao longo do artigo, serão apresentados elementos analíticos que ajudam a explicar de que maneira essas dinâmicas podem influenciar o equilíbrio competitivo entre diferentes modais de transporte e afetar a eficiência sistêmica da matriz logística brasileira.

Nesse processo, o artigo também examina alguns aspectos institucionais específicos do funcionamento do setor, que se inserem no contexto mais amplo das distorções identificadas. Esses aspectos não esgotam o conjunto de fatores que influenciam o desempenho do sistema de transporte de cargas, mas representam elementos relevantes dentro da lógica geral analisada neste estudo.

A partir dessa abordagem, o artigo busca oferecer uma base analítica estruturada para o debate sobre políticas públicas relacionadas ao transporte de cargas no Brasil, contribuindo para uma compreensão mais abrangente das dinâmicas econômicas, institucionais e concorrenciais que moldam o setor.

2. ESTRUTURA ECONÔMICA E PREDOMINÂNCIA DO TRANSPORTE RODOVIÁRIO DE CARGAS NO BRASIL

O transporte rodoviário de cargas ocupa posição central na matriz logística brasileira. Segundo o Plano Nacional de Logística 2050 (PNL 2050)[1], elaborado pela Empresa de Planejamento e Logística (EPL), aproximadamente 65% da movimentação de cargas no Brasil, medida em tonelada-quilômetro útil (TKU), é realizada pelo transporte rodoviário. O transporte ferroviário responde por cerca de 21% da matriz logística nacional, enquanto o transporte hidroviário participa com aproximadamente 12%, sendo os demais modais responsáveis por parcela residual da movimentação de cargas. Essa configuração revela elevada concentração da matriz de transportes no modal rodoviário, padrão significativamente distinto daquele observado em economias de grande dimensão territorial, nas quais a participação ferroviária e hidroviária tende a ser substancialmente maior, sobretudo em fluxos logísticos de longa distância e de grande volume.

Nos cenários prospectivos apresentados no próprio PNL 2050, projeta-se uma recomposição gradual da matriz logística brasileira ao longo das próximas décadas. Em cenários de maior eficiência sistêmica, a participação

1. https://pit.infrasa.gov.br/ (consultado em abril de 2026).

do transporte rodoviário poderia ser reduzida para patamares próximos de 50% da matriz de transporte de cargas, enquanto o transporte ferroviário poderia alcançar cerca de 30% e o transporte hidroviário, aproximadamente 18% da movimentação total medida em TKU. Essas projeções refletem o reconhecimento, no planejamento logístico nacional, de que a configuração atual da matriz de transportes impõe custos relevantes ao sistema logístico e à economia brasileira. A magnitude das mudanças projetadas evidencia que ainda existe um esforço significativo a ser realizado para aproximar a matriz logística do país de um arranjo mais equilibrado e eficiente do ponto de vista econômico, operacional e ambiental.

Em países como Estados Unidos, Canadá, Rússia e China, o transporte rodoviário desempenha papel relevante principalmente nas operações de curta e média distância e na distribuição capilar das cadeias logísticas. Já os fluxos de longa distância e de grande volume costumam ser atendidos de forma mais intensa por modais como o ferroviário e o hidroviário, que apresentam maior eficiência energética e econômica para esse tipo de transporte.

No Brasil, entretanto, o transporte rodoviário exerce papel dominante mesmo em operações logísticas de longa distância e em cadeias produtivas caracterizadas por grandes volumes de carga, como aquelas associadas ao agronegócio, à mineração e à indústria de base. Como resultado, a matriz de transportes brasileira apresenta elevado grau de concentração em um único modal, o que pode limitar o potencial de eficiência sistêmica do sistema logístico.

A predominância do transporte rodoviário na matriz de cargas brasileira resulta de um processo histórico que remonta principalmente à segunda metade do século XX. Durante esse período, políticas públicas voltadas à integração territorial e à industrialização estimularam investimentos significativos em infraestrutura rodoviária e promoveram a expansão da indústria automobilística. Ao longo das décadas seguintes, esse modelo de desenvolvimento consolidou a rede rodoviária como principal suporte da circulação de mercadorias no território nacional.

Essa trajetória contribuiu para a formação de um sistema logístico no qual o transporte por caminhões passou a representar a solução predominante para grande parte das cadeias produtivas. Mesmo em situações nas quais outros modais poderiam oferecer vantagens de custo ou eficiência energética, a infraestrutura disponível e a organização das cadeias logísticas frequentemente mantiveram o transporte rodoviário como principal alternativa operacional.

Parte dessa predominância também se explica pelas características operacionais do modal rodoviário. A extensa capilaridade da rede de rodovias permite acesso direto a um grande número de origens e destinos, enquanto a operação por caminhões oferece elevada flexibilidade logística. Essa flexibilidade permite ajustes relativamente rápidos às variações da demanda por transporte e facilita a integração com diferentes etapas das cadeias produtivas.

Contudo, além de sua importância na matriz logística, o transporte rodoviário de cargas apresenta características estruturais específicas que influenciam a dinâmica competitiva do setor e a forma como os preços de frete são formados.

Uma dessas características é o elevado grau de fragmentação da oferta. O mercado é composto por um grande número de operadores, incluindo transportadores autônomos, pequenas empresas de transporte e operadores

logísticos de diferentes portes. Dados da Agência Nacional de Transportes Terrestres indicam a existência de centenas de milhares de transportadores registrados no Registro Nacional de Transportadores Rodoviários de Cargas (RNTRC)[2], sendo uma parcela expressiva formada por transportadores autônomos.

Essa estrutura altamente atomizada reduz o poder de coordenação entre os agentes econômicos e tende a intensificar a competição baseada em preços. Em mercados caracterizados por grande número de ofertantes e baixa capacidade de coordenação coletiva, a formação de preços frequentemente ocorre em um ambiente de forte pressão competitiva, no qual os transportadores buscam garantir a ocupação de seus veículos mesmo diante de margens reduzidas.

Outro aspecto relevante diz respeito às barreiras de entrada na atividade. Em comparação com modais intensivos em infraestrutura, como o ferroviário ou o portuário, o transporte rodoviário apresenta barreiras de entrada significativamente menores. A aquisição de caminhões, seja por meio de recursos próprios ou por financiamento, permite que indivíduos ou pequenas empresas ingressem no mercado com relativa rapidez.

Essa característica faz com que a oferta de capacidade de transporte seja altamente sensível às condições econômicas e aos incentivos disponíveis para aquisição de veículos. Em períodos de maior disponibilidade de crédito ou de programas de incentivo à renovação de frota, pode ocorrer expansão significativa do número de caminhões em circulação.

Quando a expansão da frota ocorre em ritmo superior ao crescimento da demanda por transporte, o resultado pode ser o aumento da ociosidade da capacidade instalada. Nessas circunstâncias, intensifica-se a competição por cargas disponíveis, o que pode gerar pressões adicionais sobre os preços de frete praticados no mercado.

A dinâmica operacional do transporte rodoviário também contribui para esse quadro. Uma parcela relevante da quilometragem percorrida por caminhões ocorre sem carga, fenômeno conhecido como quilometragem vazia ou *deadhead mileage*. Essa ociosidade operacional reduz a produtividade média da frota e influencia a estrutura de custos da atividade.

Em termos de eficiência a literatura científica do setor converge para um intervalo típico internacional de 15% a 25% de viagens vazias no transporte rodoviário de cargas, patamar considerado compatível com sistemas logísticos relativamente eficientes (AMERICAN TRANSPORTATION RESEARCH INSTITUTE, 2023; EUROSTAT, 2023[3]).

No Brasil, entretanto, estudos indicam níveis significativamente mais elevados de ociosidade operacional. Pesquisa de Silveira (2009)[4] aponta que 46% dos caminhões circulam vazios no Estado de São Paulo, evidenciando forte desequilíbrio entre fluxos de

2. https://portal.antt.gov.br/rntrc (consultado em abril de 2026).
3. AMERICAN TRANSPORTATION RESEARCH INSTITUTE. An Analysis of the Operational Costs of Trucking. Arlington, VA: American Transportation Research Institute, 2023.
EUROSTAT. Road Freight Transport Statistics. Luxembourg: European Commission, Eurostat, 2023.
4. SILVEIRA, Márcio Rogério. Logística, sistemas de movimento, fluxos econômicos e interações espaciais no território paulista: uma abordagem para a Geografia dos Transportes e Circulação. Scripta Nova – Revista Electrónica de Geografía y Ciencias Sociales. Barcelona: Universidad de Barcelona, v. 13, n. 283, 2009.

ida e retorno no sistema logístico. O mesmo estudo também identifica que 50% das cargas movimentadas no estado têm origem e destino na macrometrópole paulista e que 92% dessas cargas são transportadas por caminhões, fatores que contribuem para maior concentração espacial de fluxos e aumento da circulação de veículos sem carga (SILVEIRA, 2009).

Além disso, o setor apresenta grande heterogeneidade entre os agentes econômicos. Transportadores autônomos frequentemente operam com estruturas de custo, níveis de gestão e acesso a financiamento distintos daqueles observados em empresas de transporte de maior porte. Essa diversidade de perfis amplia a complexidade do ambiente competitivo e pode influenciar a forma como determinados custos são considerados nas decisões operacionais dos transportadores.

Outro fator relevante diz respeito às condições institucionais associadas à operação do setor. A grande quantidade de agentes econômicos e a dispersão geográfica da atividade tornam o monitoramento e a fiscalização das operações logísticas uma tarefa complexa para as autoridades responsáveis. Em determinados contextos, limitações institucionais de fiscalização podem interagir com a estrutura competitiva do mercado, influenciando o comportamento econômico dos operadores.

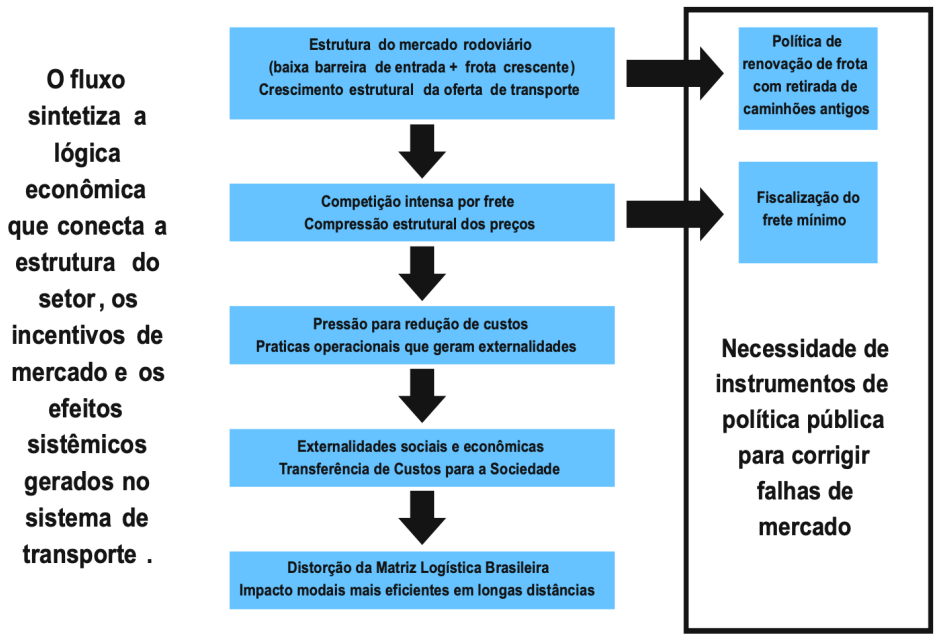
A combinação entre elevada fragmentação da oferta, baixa barreira de entrada, competição intensa por preços e dinâmica operacional complexa cria um ambiente no qual determinados custos associados à atividade podem não ser plenamente refletidos na formação de preços do transporte. Como resultado, parte dos custos econômicos e sociais relacionados à operação do transporte rodoviário pode ser transferida para outros agentes econômicos, para o setor público ou para a sociedade.

Essas características estruturais são fundamentais para compreender o funcionamento econômico do transporte rodoviário de cargas no Brasil. Elas ajudam a explicar não apenas a predominância do modal na matriz logística nacional, mas também os incentivos e comportamentos que moldam a dinâmica competitiva do setor.

A compreensão desse contexto é essencial para a análise das externalidades associadas ao transporte rodoviário de cargas. Nos capítulos seguintes, serão examinadas, de forma mais detalhada, as diferentes externalidades geradas pela atividade, bem como suas implicações econômicas, sociais e institucionais para o funcionamento do sistema de transportes e para a eficiência da matriz logística brasileira.

O fluxo a seguir sintetiza a lógica econômica que conecta a estrutura do setor, os incentivos de mercado e os efeitos sistêmicos gerados no sistema de transporte.

Figura 1. Fluxo Perverso de Distorção da Matriz Logística Brasileira



Fonte: Elaboração Própria

3. EXTERNALIDADES DO TRANSPORTE RODOVIÁRIO DE CARGAS E SUAS CONSEQUÊNCIAS SISTÊMICAS

A análise econômica do transporte de cargas frequentemente utiliza o conceito de externalidades para compreender os impactos que determinadas atividades produtivas geram sobre terceiros ou sobre a sociedade como um todo. Externalidades ocorrem quando os custos ou benefícios de uma atividade econômica não são plenamente refletidos nos preços de mercado ou nas decisões individuais dos agentes envolvidos.

No transporte rodoviário de cargas, a presença de externalidades assume especial relevância devido à elevada participação do modal na matriz logística brasileira e às características operacionais do setor. Quando determinadas regras mínimas de operação não são plenamente observadas — como manutenção adequada da frota, respeito aos limites de jornada de trabalho, observância de limites de peso e formalização das operações —, parte dos custos associados à atividade deixa de ser internalizada pelos operadores, sendo transferida para a sociedade, para o setor público ou para outros agentes econômicos.

A seguir, apresenta-se uma matriz analítica que organiza os principais comportamentos operacionais, as externalidades geradas e seus respectivos impactos sistêmicos.

Tabela 1. Externalidades e Impactos do Transporte Rodoviário de Cargas no Brasil

Categoria	Comportamento gerado	Externalidade	Impacto sistêmico
Segurança viária	Falta de manutenção da frota	Maior probabilidade de falhas mecânicas	Aumento da ocorrência de acidentes rodoviários
Segurança viária	Pneus e sistemas de freio desgastados	Redução da capacidade de frenagem	Acidentes mais graves
Segurança viária	Jornadas excessivas de trabalho	Fadiga do motorista	Aumento da probabilidade de acidentes
Segurança viária	Excesso de peso nos veículos	Perda de estabilidade e controle	Acidentes com maior gravidade
Infraestrutura	Transporte com excesso de peso	Desgaste acelerado do pavimento	Aumento do custo de manutenção das rodovias
Infraestrutura	Excesso de peso recorrente	Redução da vida útil da infraestrutura rodoviária	Aumento do gasto público em reabilitação de rodovias
Infraestrutura	Uso de frota envelhecida	Maior impacto estrutural no pavimento	Elevação dos custos de conservação rodoviária
Ambiental	Frota antiga e tecnologicamente defasada	Emissões mais elevadas de poluentes	Impactos sobre qualidade do ar
Ambiental	Motores antigos e ineficientes	Maior consumo de combustível	Aumento das emissões de CO_2
Ambiental	Emissões de particulados do diesel	Poluição atmosférica	Impactos sanitários em áreas urbanas
Econômico	Ausência de provisão para depreciação	Sucateamento progressivo da frota	Redução da produtividade do setor
Econômico	Aceitação de fretes abaixo do custo econômico	Subprecificação do transporte	Concorrência predatória
Econômico	Fretes de retorno extremamente baixos	Compressão estrutural dos preços	Sustentabilidade econômica comprometida
Mercado	Baixas barreiras de entrada	Entrada excessiva de operadores	Excesso de oferta de transporte
Mercado	Operadores sem qualificação técnica	Baixa eficiência operacional	Maior risco operacional
Fiscal	Informalidade nas operações	Sonegação tributária	Redução da arrecadação pública
Fiscal	Ausência de contratos formais	Dificuldade de fiscalização	Elevação dos custos administrativos
Saúde pública	Jornadas excessivas	Doenças ocupacionais	Custos previdenciários e assistenciais
Saúde pública	Fadiga crônica dos motoristas	Afastamentos do trabalho	Impactos no sistema previdenciário
Logística nacional	Frete rodoviário artificialmente baixo	Distorção da matriz de transporte	Subutilização de ferrovias e hidrovias
Logística nacional	Competição baseada apenas em preço	Uso excessivo do modal rodoviário	Ineficiência sistêmica da logística
Competitividade nacional	Subprecificação do rodoviário	Desincentivo a investimentos em outros modais	Redução da eficiência logística do país

Fonte: Elaboração Própria

A primeira dimensão de externalidades refere-se à segurança viária. A falta de manutenção adequada dos veículos, o uso de pneus e freios desgastados, a realização de jornadas excessivas e o transporte de cargas acima dos limites permitidos elevam significativamente o risco de acidentes rodoviários. Esses acidentes produzem impactos sociais relevantes, incluindo perdas de vidas humanas, ferimentos graves, custos hospitalares e interrupções no fluxo de tráfego. Uma parcela significativa desses custos é absorvida pelo sistema público de saúde, pelos sistemas de seguros e pela sociedade em geral.

Os custos sociais associados aos acidentes rodoviários também são expressivos. Estimativas do Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (IPEA) indicam que o custo total dos acidentes de trânsito no Brasil alcançou aproximadamente R$ 40 bilhões em 2014, considerando rodovias federais, estaduais e municipais. Nesse contexto, o custo médio estimado de um acidente fatal foi de aproximadamente R$ 647 mil (FRAGOSO JUNIOR; GARCIA, 2019)[5].

No período analisado pelo estudo (2008-2012), o transporte rodoviário de cargas destacou-se entre as atividades econômicas com maior número de acidentes de trabalho fatais no país. Nesse intervalo, o setor registrou 1.430 mortes por acidentes de trabalho, representando 10,4% de todos os acidentes de trabalho fatais no Brasil. A taxa média de mortalidade no setor foi de 37,97 mortes por 100 mil vínculos de emprego, uma das mais elevadas entre as atividades econômicas analisadas.

Outra dimensão relevante envolve os impactos sobre a infraestrutura rodoviária. O transporte de cargas com excesso de peso acelera o desgaste do pavimento e reduz a vida útil das rodovias. Veículos de carga pesados exercem impacto exponencial sobre o pavimento, de modo que pequenas variações no peso transportado podem gerar deterioração significativa da infraestrutura. Esse fenômeno resulta no aumento dos gastos públicos com manutenção e reabilitação da malha rodoviária e pode elevar os custos de concessões rodoviárias.

No campo ambiental, a operação de frotas envelhecidas e tecnologicamente defasadas contribui para a emissão de maiores quantidades de poluentes atmosféricos e gases de efeito estufa. Motores mais antigos apresentam maior consumo de combustível e maior emissão de dióxido de carbono, além de níveis mais elevados de material particulado e outros poluentes associados ao diesel. Esses impactos afetam diretamente a qualidade do ar e geram consequências relevantes para a saúde da população.

Os impactos ambientais e energéticos estão associados às emissões de poluentes e ao consumo intensivo de combustíveis fósseis. Em 2023, a demanda total de diesel no Brasil alcançou 58,2 bilhões de litros, dos quais 46,2 bilhões de litros foram destinados ao transporte rodoviário. Desse volume, aproximadamente 34,6 bilhões de litros foram consumidos especificamente pelo transporte rodoviário de cargas, o que, considerando um preço médio de R$ 5,80 por litro, corresponde a uma despesa total estimada de R$ 200,8 bilhões com combustível no setor (GO ASSOCIADOS, 2026).

5. FRAGOSO JUNIOR, Ademar; GARCIA, Eduardo Garcia. Transporte rodoviário de carga: acidentes de trabalho fatais e fiscalização trabalhista. Revista Brasileira de Saúde Ocupacional, v. 44, e3, 2019. DOI: https://doi.org/10.1590/2317-6369000018317

As externalidades também se manifestam na dimensão econômica e operacional do setor. A ausência de provisão adequada de depreciação da frota pode levar ao sucateamento dos veículos e à redução da produtividade do transporte. A aceitação de fretes abaixo do custo econômico real da atividade e a prática de fretes de retorno extremamente baixos contribuem para a compressão generalizada dos preços de frete e para a formação de um ambiente de concorrência predatória no setor.

No âmbito da estrutura de mercado, a presença de baixas barreiras de entrada facilita o ingresso de novos operadores, muitas vezes sem preparo técnico ou capacidade de gestão adequada. Esse fenômeno pode gerar excesso de oferta de transporte e intensificar a competição baseada exclusivamente em preços, ampliando os incentivos para práticas operacionais que reduzem custos à custa de maior risco ou menor eficiência.

Externalidades adicionais surgem na esfera fiscal e institucional. A informalidade nas operações de transporte e a ausência de contratos formais dificultam a fiscalização das atividades, favorecem a sonegação tributária e reduzem a arrecadação pública. Ao mesmo tempo, essas condições aumentam os custos administrativos associados ao monitoramento e à regulação do setor.

Há ainda externalidades de natureza fiscal e institucional, relacionadas à dificuldade de internalizar plenamente todos os custos regulatórios, operacionais e de fiscalização associados à atividade. A partir da análise de dados da Receita Federal, ANTT, IBGE, ANP e outras bases públicas, GO ASSOCIADOS (2026) estima que a sonegação tributária associada ao transporte rodoviário de cargas no Brasil situa-se entre R$ 31,3 bilhões e R$ 34,1 bilhões por ano, com valor médio próximo de R$ 32,7 bilhões anuais de perda de arrecadação pública.

A decomposição dessa perda fiscal indica que aproximadamente R$ 11,5 bilhões correspondem a contribuições previdenciárias não recolhidas, cerca de R$ 10,2 bilhões referem-se a tributos estaduais, sobretudo ICMS, enquanto R$ 7,6 bilhões correspondem a tributos federais e aproximadamente R$ 3,4 bilhões, a tributos municipais. Esses valores evidenciam que a informalidade no transporte rodoviário não constitui apenas um problema setorial, mas também uma questão relevante para o equilíbrio fiscal e para o financiamento da seguridade social (GO ASSOCIADOS, 2026).

No campo da saúde pública e das condições de trabalho, jornadas excessivas e fadiga crônica entre motoristas profissionais podem gerar doenças ocupacionais, afastamentos do trabalho e aumento da incidência de acidentes. Esses efeitos produzem custos adicionais para os sistemas previdenciários e para o sistema público de saúde.

Estima-se que aproximadamente 1,9 milhão de pessoas trabalhem diretamente no setor, entre motoristas profissionais, transportadores autônomos e trabalhadores vinculados às empresas de transporte. Esse contingente evidencia a importância do TRC para o funcionamento da economia e para a circulação de mercadorias no território nacional (CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE, 2025)[6].

6. CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE (CNT). Perfil e preferências dos caminhoneiros 2025. Brasília: CNT, 2025.

Pesquisas sobre as condições de trabalho dos caminhoneiros indicam que a atividade é marcada por jornadas prolongadas de direção, frequentemente associadas a níveis elevados de fadiga. A Pesquisa CNT Perfil do Caminhoneiro (2019) aponta que 61,1% dos motoristas dirigem mais de 9 horas por dia, enquanto 43,2% afirmam já ter dirigido sob forte cansaço ou sono, e 27,7% relatam ter cochilado ao volante em algum momento da carreira. Esses dados evidenciam a presença recorrente de fadiga na atividade profissional (CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE, 2019)[7].

Estudos acadêmicos conduzidos por pesquisadores da Universidade de São Paulo (USP) e da Universidade Federal de São Paulo (Unifesp) reforçam esse diagnóstico. Segundo essas pesquisas, 71% dos caminhoneiros dirigem mais de 10 horas por dia, 37% relatam episódios frequentes de sonolência ao volante, e 27% afirmam já ter se envolvido em acidentes associados à fadiga (MORENO et al.)[8].

Dados da Polícia Rodoviária Federal (PRF) indicam que fatores humanos relacionados ao cansaço também têm peso significativo na sinistralidade rodoviária. Levantamentos da instituição mostram que o cansaço ou sono do motorista está presente em aproximadamente 21% dos acidentes graves envolvendo caminhões nas rodovias federais brasileiras (POLÍCIA RODOVIÁRIA FEDERAL)[9].

Outro aspecto relevante associado às jornadas prolongadas é o uso de substâncias estimulantes para prolongar o tempo de direção. Estudos conduzidos por Leyton et al. indicam que aproximadamente 30% dos caminhoneiros relatam uso de anfetaminas (“rebite”) para permanecer acordados durante viagens longas, fenômeno frequentemente associado a jornadas superiores a 12 horas de direção (LEYTON et al.)[10].

Quando consideradas em conjunto, essas externalidades produzem consequências estruturais sobre o funcionamento do sistema logístico nacional. Um dos efeitos mais relevantes ocorre quando o frete rodoviário é sistematicamente subprecificado em relação ao seu custo econômico real. Nessa situação, o transporte rodoviário pode aparentar ser mais barato do que realmente é, quando comparado a outros modais.

Esse fenômeno pode levar ao uso do transporte rodoviário em situações nas quais outros modais (ferrovias, cabotagem, dutovias e hidrovias) poderiam oferecer maior eficiência econômica, especialmente em operações de longa distância ou grande volume. Como resultado, ocorre a subutilização de modais potencialmente mais eficientes e a consolidação de uma matriz logística excessivamente dependente do transporte rodoviário.

Esse processo também pode gerar efeitos negativos sobre a competitividade da economia. Quando o preço do transporte rodoviário reflete apenas

7. CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE (CNT). Pesquisa CNT Perfil do Caminhoneiro. Brasília: CNT, 2019.
8. MORENO, C. R. C. et al. Estudos sobre sono, fadiga e trabalho de caminhoneiros. São Paulo: Universidade de São Paulo; Universidade Federal de São Paulo.
9. POLÍCIA RODOVIÁRIA FEDERAL (PRF). Relatórios estatísticos de acidentes em rodovias federais. Brasília: PRF.
10. LEYTON, V. et al. Use of amphetamines by truck drivers in Brazil. Revista Brasileira de Psiquiatria, São Paulo

parte dos custos associados à atividade, investimentos em modais alternativos podem tornar-se menos atrativos, dificultando a construção de um sistema logístico mais equilibrado e eficiente.

Em síntese, as externalidades associadas ao transporte rodoviário de cargas não se limitam a impactos isolados sobre segurança, meio ambiente ou saúde pública. Elas produzem efeitos sistêmicos que influenciam a dinâmica competitiva do setor, a formação de preços de frete e a própria organização da matriz logística nacional.

4. FALHAS DE MERCADO NO TRANSPORTE RODOVIÁRIO DE CARGAS

A análise das externalidades associadas ao transporte rodoviário de cargas permite identificar a presença de distorções estruturais no funcionamento desse mercado. Do ponto de vista da teoria econômica, essas distorções caracterizam situações típicas de falha de mercado, nas quais o equilíbrio competitivo resultante das decisões individuais dos agentes não conduz, necessariamente, a uma alocação eficiente de recursos do ponto de
vista social.

Em mercados competitivos ideais, o sistema de preços desempenha a função de coordenar decisões descentralizadas de produção e consumo, refletindo os custos e benefícios associados às atividades econômicas. Quando todos os custos relevantes são internalizados pelos agentes que participam das transações econômicas, o equilíbrio de mercado tende a maximizar o bem-estar agregado, pois os preços sinalizam adequadamente os custos econômicos das atividades.

Entretanto, quando parte desses custos é transferida para terceiros ou para a sociedade, o preço observado no mercado deixa de refletir o custo social efetivo da atividade. Nesses casos, o equilíbrio competitivo pode tornar-se socialmente ineficiente, produzindo níveis de atividade superiores ao que seria economicamente desejável. Esse fenômeno é amplamente reconhecido na literatura econômica desde os trabalhos clássicos de Arthur Pigou sobre externalidades negativas.

No caso do transporte rodoviário de cargas, diversos custos associados à operação do sistema não são plenamente refletidos no preço do frete. Entre esses custos encontram-se, por exemplo, o desgaste acelerado da infraestrutura rodoviária, os impactos associados a acidentes de trânsito, os efeitos ambientais decorrentes das emissões veiculares e os impactos sobre a saúde e as condições de trabalho dos motoristas. Quando esses custos não são plenamente internalizados pelos agentes que operam no mercado, o preço do frete rodoviário tende a refletir apenas os custos privados da operação e não o custo social total do transporte.

Essa diferença entre custo privado e custo social gera um incentivo econômico para que o volume de transporte rodoviário seja superior ao nível socialmente eficiente. Em outras palavras, o sistema de preços passa a sinalizar um custo artificialmente reduzido para o transporte rodoviário, estimulando uma utilização mais intensiva desse modal em relação ao que ocorreria caso todos os custos sociais estivessem refletidos no preço.

A dinâmica econômica do setor é reforçada por outra característica estrutural do transporte rodoviário de cargas: a presença de baixas barreiras de entrada no mercado. Diferentemente

de outros modais de transporte, cuja expansão depende de investimentos intensivos em infraestrutura ou de regimes de concessão e autorização regulatória, o transporte rodoviário apresenta um ambiente institucional que permite a entrada relativamente rápida de novos operadores.

Essa facilidade de entrada faz com que o setor responda rapidamente a períodos de crescimento da demanda por transporte. Ao mesmo tempo, os mecanismos de saída de capacidade do mercado tendem a ser mais lentos e limitados, especialmente no que se refere à retirada de caminhões mais antigos da frota. Como resultado, o setor frequentemente opera com níveis de oferta superiores à demanda efetiva de transporte.

A combinação entre facilidade de entrada e lentidão na retirada de ativos contribui para a formação de um excesso estrutural de capacidade no mercado de transporte rodoviário. Em mercados atomizados, com grande número de agentes, decisões individuais de investimento podem gerar resultados coletivos subótimos. Cada transportador toma sua decisão com base em expectativas individuais de renda, mas o resultado agregado dessas decisões pode produzir um nível de capacidade instalada superior ao economicamente eficiente.

Esse fenômeno é frequentemente descrito na literatura econômica como uma forma de falha de coordenação em mercados descentralizados. Mesmo que cada agente tome decisões racionais do ponto de vista individual, o resultado coletivo pode levar à persistência de um equilíbrio caracterizado por excesso de oferta e compressão de preços.

Em contextos de excesso de capacidade, a competição entre agentes tende a ocorrer por meio da redução de preços. Quando os custos privados são relativamente rígidos, essa pressão competitiva pode incentivar estratégias adicionais de redução de custos operacionais.

Em um contexto no qual determinadas externalidades não são plenamente internalizadas, parte dessa redução de custos pode ocorrer por meio da transferência indireta de riscos e custos para terceiros, incluindo motoristas, usuários da infraestrutura rodoviária e a sociedade em geral. Esse processo pode se manifestar, por exemplo, na intensificação da utilização da frota, na postergação de investimentos em manutenção ou renovação de veículos e na ampliação das jornadas de trabalho dos motoristas.

A dificuldade prática de fiscalização e monitoramento dos critérios mínimos de segurança operacional e de sustentabilidade econômica da atividade também contribui para reforçar essa dinâmica. Em um setor caracterizado por elevado número de operadores e grande dispersão geográfica das operações, a capacidade de supervisão efetiva das condições de operação dos veículos, do cumprimento de normas de segurança e das condições de trabalho dos motoristas torna-se limitada. Esse contexto reduz a efetividade de normas que buscam estabelecer padrões mínimos para o funcionamento do mercado, permitindo que práticas operacionais com menores custos privados, mas potencialmente maiores riscos sociais, persistam como estratégias competitivas em determinados segmentos do setor.

Do ponto de vista econômico, esse processo gera uma forma de competição baseada em custos sociais não precificados, na qual a redução do preço de mercado não resulta necessariamente de ganhos de eficiência

produtiva, mas da transferência de custos para agentes externos ao mercado. Como consequência, o preço do frete rodoviário pode se afastar ainda mais do custo social efetivo da atividade, reforçando o processo de subprecificação do transporte.

Essa dinâmica também é influenciada por diferenças institucionais e regulatórias entre os modais de transporte. Modais como ferrovias, hidrovias e cabotagem operam, em geral, sob estruturas regulatórias que envolvem concessões, autorizações ou investimentos intensivos em infraestrutura, frequentemente associados a compromissos de investimento de longo prazo e obrigações regulatórias específicas. Esses regimes institucionais tendem a impor restrições mais claras à expansão da oferta e a exigir horizontes de investimento mais longos e estruturados.

O transporte rodoviário de cargas, por sua vez, apresenta um regime institucional mais aberto e descentralizado, com maior facilidade de entrada e menor exigência de compromissos estruturais de investimento. Embora essa flexibilidade represente uma vantagem operacional importante, ela também contribui para ampliar a volatilidade da oferta e reforçar a dinâmica de excesso de capacidade observada no setor.

Essa assimetria regulatória entre modais contribui para ampliar as distorções associadas ao transporte rodoviário. Enquanto modais intensivos em infraestrutura operam sob estruturas institucionais que disciplinam a expansão da capacidade e exigem compromissos de investimento de longo prazo, o transporte rodoviário apresenta maior flexibilidade de ajuste da oferta, o que pode intensificar a competição por fretes em contextos de excesso de capacidade.

Do ponto de vista da teoria econômica, a coexistência de múltiplas distorções estruturais pode levar à formação de equilíbrios de segundo melhor. Nesses contextos, a simples presença de competição de mercado não garante, necessariamente, resultados eficientes, uma vez que o sistema de preços continua refletindo apenas parcialmente os custos econômicos reais da atividade.

No caso do transporte rodoviário de cargas, a combinação entre externalidades negativas não internalizadas, excesso estrutural de capacidade, competição baseada em custos sociais não precificados e assimetrias institucionais entre modais contribui para a formação de um equilíbrio de mercado que, embora competitivo do ponto de vista formal, não necessariamente conduz a uma alocação eficiente de recursos do ponto de vista social.

Esse processo não apenas afeta a dinâmica interna do setor, mas também produz efeitos mais amplos sobre o funcionamento do sistema logístico nacional. Ao reduzir artificialmente o custo aparente do transporte rodoviário, essas distorções podem influenciar decisões de produção, investimento e escolha modal em toda a cadeia logística.

Dessa forma, compreender as falhas de mercado presentes no transporte rodoviário de cargas constitui um passo fundamental para avaliar os desafios associados à organização eficiente da matriz logística brasileira e ao desenvolvimento de políticas públicas capazes de alinhar, de forma mais adequada, os custos privados e os custos sociais do sistema de transporte.

5. EFEITOS SOBRE A MATRIZ DE TRANSPORTES BRASILEIRA

As distorções econômicas associadas ao transporte rodoviário de cargas não se limitam à dinâmica interna desse mercado. Ao afetarem a formação de preços e as condições de competição entre transportadores, essas distorções também produzem efeitos mais amplos sobre o funcionamento da matriz de transportes do país.

Em sistemas logísticos eficientes, a distribuição modal do transporte de cargas tende a refletir as vantagens econômicas relativas de cada modalidade. Modais intensivos em capital, como ferrovias e hidrovias, costumam apresentar maior eficiência em operações de longa distância e no transporte de grandes volumes de carga. O transporte rodoviário, por sua vez, apresenta maior flexibilidade operacional e tende a desempenhar papel predominante em operações de curta distância, distribuição regional e integração entre diferentes modais.

Quando os preços de transporte refletem adequadamente os custos econômicos associados a cada modalidade, o sistema logístico tende a evoluir de forma a aproveitar essas complementaridades. Entretanto, quando determinadas modalidades operam sob condições de custo que não refletem plenamente os custos sociais da atividade, a escolha modal pode passar a refletir distorções de preços e não necessariamente ganhos reais de eficiência.

No caso do transporte rodoviário de cargas no Brasil, a combinação entre externalidades negativas não internalizadas, excesso estrutural de capacidade e competição baseada em custos sociais não precificados contribui para reduzir artificialmente o custo aparente do transporte rodoviário. Como consequência, decisões logísticas tomadas por embarcadores e operadores passam a ocorrer em um ambiente de preços que não reflete integralmente os custos econômicos das diferentes alternativas de transporte.

Essa dinâmica pode induzir uma utilização mais intensiva do transporte rodoviário em segmentos de mercado nos quais outros modais poderiam apresentar maior eficiência econômica. Em particular, cargas de grande volume e de longas distâncias, que, em muitos sistemas logísticos são transportadas predominantemente por ferrovia ou por vias navegáveis, podem continuar sendo movimentadas por rodovias quando o diferencial de preços entre modais não reflete plenamente os custos sociais de cada alternativa.

A persistência desse tipo de distorção pode produzir efeitos cumulativos sobre a organização da matriz de transportes ao longo do tempo. Ao reduzir artificialmente o custo aparente do transporte rodoviário, o sistema econômico passa a gerar sinais de preço que favorecem investimentos, decisões operacionais e estruturas logísticas mais intensivas no uso das rodovias.

Esse processo pode influenciar tanto as decisões privadas de investimento em ativos logísticos quanto a própria estrutura de organização das cadeias produtivas. As empresas podem estruturar suas cadeias de suprimento com base em soluções logísticas predominantemente rodoviárias, mesmo em contextos nos quais alternativas intermodais poderiam oferecer ganhos de eficiência no longo prazo.

Além disso, a presença de preços comprimidos no transporte rodoviário

pode afetar indiretamente a atratividade econômica de investimentos em outros modais de transporte. Projetos ferroviários, hidroviários ou de cabotagem dependem, em geral, de horizontes de investimento de longo prazo e da existência de volumes de carga suficientes para garantir viabilidade econômica. Quando o transporte rodoviário opera com preços artificialmente reduzidos em função de externalidades não internalizadas, a comparação econômica entre modais pode tornar-se distorcida, reduzindo o incentivo ao desenvolvimento de alternativas logísticas mais eficientes em determinados segmentos de mercado.

Essa dinâmica pode contribuir para a persistência de uma matriz de transportes excessivamente dependente do modal rodoviário. No caso brasileiro, essa característica já é frequentemente apontada em análises de política logística e de planejamento de infraestrutura, que destacam a elevada participação do transporte rodoviário na movimentação de cargas em comparação com outros países de dimensões territoriais semelhantes.

Do ponto de vista econômico, essa configuração pode ser interpretada como o resultado acumulado de sinais de preços que não refletem plenamente os custos sociais associados ao transporte rodoviário. Ao longo do tempo, esses sinais influenciam decisões descentralizadas de produção, investimento e organização logística, contribuindo para consolidar uma estrutura modal que pode não ser a mais eficiente sob a perspectiva sistêmica.

Os efeitos dessas distorções também se manifestam na própria dinâmica de investimentos em infraestrutura. Quando a matriz logística se torna excessivamente dependente de um único modal, a pressão sobre a infraestrutura correspondente tende a se intensificar, ampliando problemas de congestionamento, desgaste de ativos e necessidade de manutenção.

Nesse contexto, a discussão sobre as falhas de mercado no transporte rodoviário de cargas não se limita a uma análise setorial. Ela se conecta diretamente ao debate sobre a organização da matriz logística nacional, a eficiência do sistema de transportes e as condições econômicas que orientam decisões de investimento público e privado em infraestrutura.

Compreender esses efeitos sistêmicos é fundamental para avaliar, de forma mais ampla, os desafios associados ao desenvolvimento de uma matriz de transportes equilibrada, capaz de explorar de maneira mais eficiente as complementaridades entre diferentes modais e reduzir os custos logísticos agregados da economia.

6. ELEMENTOS INSTITUCIONAIS PARA A REDUÇÃO DAS EXTERNALIDADES NO TRANSPORTE RODOVIÁRIO DE CARGAS

A análise desenvolvida ao longo deste artigo evidencia que parte relevante das distorções observadas no mercado de transporte rodoviário de cargas decorre da presença de externalidades não internalizadas, de assimetrias institucionais entre modais e de dificuldades estruturais de fiscalização de condições mínimas de operação da atividade. Essas características contribuem para a formação de um ambiente competitivo no qual parcela dos agentes econômicos consegue operar transferindo parte de seus custos para terceiros seja na forma de degradação acelerada da infraestrutura

rodoviária, de aumento do risco de acidentes, de deterioração das condições de trabalho dos motoristas ou impactos ambientais e sociais associados à atividade.

Em mercados que apresentam essas características, a formação de preços tende a refletir apenas parcialmente os custos econômicos da operação. Como consequência, observa-se frequentemente um processo de competição baseado na redução de custos sociais não precificados, e não em ganhos de eficiência produtiva. Esse fenômeno tende a produzir uma subprecificação estrutural do transporte rodoviário, ampliando distorções concorrenciais e reforçando a predominância desse modal mesmo em situações nas quais outros modais poderiam operar de forma mais eficiente.

Nesse contexto, políticas públicas voltadas ao setor precisam lidar simultaneamente com duas dimensões distintas do problema. Por um lado, é necessário enfrentar as externalidades diretamente associadas à operação do transporte rodoviário. Por outro, é preciso criar condições institucionais que permitam que os preços observados no mercado reflitam, de forma mais adequada, os custos econômicos reais da atividade.

Entre os instrumentos atualmente existentes, a política de preços mínimos de frete pode ser interpretada como um mecanismo de intervenção emergencial voltado a mitigar os efeitos mais extremos da subprecificação do transporte rodoviário. Em um ambiente caracterizado por elevada fragmentação da oferta, forte assimetria de informação e significativa heterogeneidade nas condições de operação dos transportadores, a competição pode se deslocar para dimensões relacionadas à redução de custos sociais não internalizados, como jornadas excessivas de trabalho, manutenção inadequada da frota ou descumprimento de normas técnicas de segurança.

Nessas circunstâncias, a política de frete mínimo funciona como um instrumento de contenção institucional, estabelecendo um piso abaixo do qual a remuneração do transporte tende a se tornar incompatível com padrões mínimos de operação econômica da atividade. Do ponto de vista da teoria econômica, trata-se de um mecanismo que pode ser interpretado como uma solução de segunda melhor (*second-best regulation*), utilizada em contextos nos quais não é possível corrigir imediatamente todas as falhas de mercado presentes no setor.

Essa interpretação permite compreender a política de preços mínimos não como um instrumento permanente de controle de preços, mas como uma medida transitória voltada a estabilizar o funcionamento do mercado, enquanto outras políticas estruturais voltadas à internalização das externalidades da atividade são implementadas e consolidadas.

A redução da dependência de instrumentos administrativos de controle de preços requer, portanto, a construção de um ambiente institucional capaz de reduzir os incentivos à transferência de custos sociais para terceiros. Isso envolve um conjunto amplo de políticas públicas relacionadas à regulação das condições operacionais do transporte rodoviário, à fiscalização da atividade e à estrutura de incentivos econômicos do setor.

Um primeiro eixo relevante refere-se à regulação da jornada de trabalho e das condições de descanso dos motoristas. A literatura especializada demonstra que a fadiga constitui um dos principais fatores associados à ocorrência de

acidentes envolvendo veículos pesados. Estudos indicam que o risco de acidentes aumenta significativamente com o prolongamento do tempo contínuo de direção, podendo multiplicar-se diversas vezes após períodos prolongados de condução sem descanso adequado. Em muitos casos, a estrutura de remuneração baseada em produtividade ou no número de viagens cria incentivos econômicos para jornadas excessivas de trabalho, ampliando o risco de acidentes e transferindo custos sociais relevantes para o conjunto da sociedade, na forma de gastos hospitalares, perdas de produtividade e custos previdenciários.

Nesse contexto, o fortalecimento da fiscalização da legislação relativa à jornada de trabalho e aos períodos mínimos de descanso dos motoristas constitui um elemento central para a redução dessas externalidades. A utilização de instrumentos tecnológicos de monitoramento da atividade, sistemas digitais de registro de viagens e o desenvolvimento de infraestrutura adequada de áreas de parada e descanso nas rodovias podem contribuir significativamente para aumentar a efetividade dessas normas.

Outro eixo relevante refere-se à fiscalização das condições técnicas da frota de veículos. A competição baseada na redução de custos operacionais pode incentivar alguns agentes a reduzir gastos com manutenção preventiva, substituição de componentes críticos ou atualização tecnológica dos veículos. Práticas como utilização de pneus desgastados, manutenção inadequada de sistemas de freio ou operação de veículos em condições técnicas precárias aumentam significativamente o risco de acidentes e ampliam os custos sociais associados ao transporte rodoviário.

O fortalecimento de mecanismos de inspeção técnica veicular, a rastreabilidade das condições de manutenção da frota e a integração de sistemas de fiscalização entre diferentes órgãos públicos podem contribuir para reduzir essas distorções e promover um ambiente competitivo mais equilibrado entre os operadores do setor.

Outro fator relevante diz respeito ao controle do excesso de peso transportado pelos veículos. O transporte de cargas acima dos limites estabelecidos pela regulamentação constitui uma prática recorrente em diversos mercados de transporte rodoviário e produz impactos significativos sobre a durabilidade da infraestrutura viária. O desgaste do pavimento apresenta relação direta com o peso por eixo dos veículos, de modo que o transporte sistemático de cargas acima dos limites regulamentares pode reduzir drasticamente a vida útil das rodovias, aumentando os custos de manutenção da infraestrutura e transferindo esses custos para o conjunto da sociedade.

A ampliação de sistemas automatizados de pesagem em rodovias, o fortalecimento das estruturas de fiscalização e a integração de dados entre órgãos reguladores e concessionárias de rodovias constituem instrumentos importantes para reduzir essas externalidades.

Outro aspecto relevante refere-se à elevada informalidade observada em parte do mercado de transporte rodoviário de cargas. A ausência de contratos formais de transporte e a utilização de mecanismos informais de contratação dificultam a fiscalização de aspectos fundamentais da atividade, como cumprimento da legislação trabalhista, recolhimento de tributos,

controle da jornada de trabalho e rastreabilidade das operações de transporte. Essa informalidade contribui para ampliar a assimetria de informação no mercado e pode gerar vantagens competitivas artificiais para operadores que não cumprem plenamente as normas vigentes.

Políticas voltadas à digitalização de documentos de transporte, à integração de bases de dados fiscais e logísticas e ao incentivo à formalização contratual das operações podem contribuir para reduzir essas distorções e melhorar o funcionamento competitivo do setor.

Outro elemento importante refere-se à ausência de mecanismos econômicos adequados para incentivar a renovação da frota de veículos. Em muitos casos, a estrutura de preços observada no mercado de fretes não incorpora plenamente a depreciação econômica dos veículos, o que reduz os incentivos para que os transportadores provisionem recursos para a substituição periódica da frota. Como consequência, observa-se um processo gradual de envelhecimento do parque de veículos, com impactos negativos sobre a segurança viária, a eficiência energética e o nível de emissões ambientais.

Nesse contexto, programas de incentivo à renovação da frota podem desempenhar papel relevante na modernização do setor. No entanto, tais políticas precisam ser cuidadosamente desenhadas para evitar que a introdução de novos veículos no mercado resulte simplesmente na ampliação da capacidade total do setor, sem a retirada proporcional de veículos antigos. Caso isso ocorra, programas de renovação podem inadvertidamente contribuir para ampliar o excesso estrutural de capacidade já observado no transporte rodoviário de cargas.

Por essa razão, políticas eficazes de renovação da frota tendem a incluir mecanismos que condicionem o acesso a incentivos financeiros à retirada definitiva de veículos antigos de circulação, evitando o aumento da capacidade total do sistema e contribuindo simultaneamente para a modernização tecnológica da frota.

Outro aspecto relevante refere-se às assimetrias institucionais existentes entre diferentes modais de transporte. Enquanto modais como ferrovias e hidrovias frequentemente operam sob regimes institucionais que envolvem compromissos de investimento de longo prazo e estruturas regulatórias mais definidas, o transporte rodoviário apresenta maior flexibilidade de entrada e expansão de capacidade. Essa diferença institucional pode influenciar a formação de preços relativos entre modais e contribuir para reforçar a predominância do transporte rodoviário em segmentos de mercado nos quais soluções logísticas intermodais poderiam apresentar maior eficiência econômica.

Políticas voltadas ao desenvolvimento de corredores logísticos multimodais, à integração operacional entre modais e à redução de barreiras institucionais à intermodalidade podem contribuir para reduzir essas distorções e melhorar a eficiência sistêmica da matriz de transportes.

Outro elemento importante refere-se à assimetria de informação existente no mercado de fretes. Em mercados altamente fragmentados e com elevado número de operadores independentes, os agentes econômicos frequentemente dispõem de informações incompletas sobre as condições efetivas de mercado, o que pode dificultar a formação eficiente de preços. O desenvolvimento

de sistemas públicos ou privados de informação sobre preços de frete, volumes transportados e condições operacionais do mercado pode contribuir para reduzir essas assimetrias e melhorar o funcionamento competitivo do setor.

Considerados em conjunto, esses diferentes instrumentos institucionais apontam para uma agenda mais ampla de políticas públicas voltadas à redução das externalidades associadas ao transporte rodoviário de cargas. A implementação gradual dessas medidas pode contribuir para que os custos sociais da atividade sejam progressivamente internalizados pelos agentes econômicos, aproximando os custos privados de operação de seus custos sociais efetivos.

À medida que essas externalidades forem sendo reduzidas ou internalizadas por meio de instrumentos regulatórios, tecnológicos e institucionais, a formação de preços no mercado de fretes tende a refletir, de maneira mais adequada, os custos econômicos reais da atividade. Nesse cenário, a necessidade de instrumentos administrativos de controle de preços, como a fiscalização de pisos mínimos de frete, tende a se reduzir progressivamente.

Sob essa perspectiva, a política de frete mínimo pode ser interpretada como um instrumento transitório de estabilização do mercado, cuja função principal é mitigar os efeitos mais extremos de um ambiente competitivo distorcido, enquanto políticas estruturais voltadas à correção das falhas de mercado são desenvolvidas e consolidadas.

A construção de um ambiente institucional mais equilibrado, no qual os custos sociais da atividade sejam adequadamente internalizados, constitui, portanto, condição essencial para que o transporte rodoviário de cargas possa operar em bases mais eficientes e sustentáveis no longo prazo, contribuindo para a melhoria da eficiência da matriz logística brasileira e para a redução dos custos econômicos e sociais associados ao transporte de cargas no país.

Nesse contexto, duas agendas institucionais assumem especial relevância no curto prazo. A primeira refere-se à necessidade de fortalecimento da fiscalização da política de preços mínimos de frete, instrumento que, nas condições atuais do mercado, desempenha papel importante na contenção dos efeitos mais extremos da subprecificação do transporte rodoviário. Enquanto persistirem externalidades relevantes e dificuldades estruturais de fiscalização das condições mínimas de operação da atividade, a aplicação efetiva desse mecanismo constitui um elemento relevante para evitar que a competição no setor continue baseada na transferência de custos sociais para terceiros.

A segunda agenda refere-se à estrutura de incentivos associada à renovação da frota de veículos. Programas voltados à modernização do parque de caminhões podem produzir ganhos relevantes em termos de eficiência energética, segurança viária e redução de emissões. No entanto, para que esses benefícios se materializem plenamente, é fundamental que tais políticas estejam associadas a mecanismos que garantam a retirada efetiva de veículos antigos de circulação. Na ausência de instrumentos de sucateamento ou de desativação definitiva da frota mais envelhecida, programas de incentivo à aquisição de novos veículos podem resultar simplesmente na ampliação da capacidade total do setor, agravando o excesso estrutural de oferta já observado no transporte rodoviário de cargas.

Dessa forma, a defesa da fiscalização efetiva da política de fretes mínimos e a promoção de mecanismos que associem a renovação da frota à retirada de veículos antigos de circulação constituem dois passos iniciais concretos dentro de uma agenda mais ampla de correção das distorções estruturais identificadas neste artigo. Ambos os temas representam, portanto, pontos de partida relevantes para a construção de políticas públicas capazes de reduzir externalidades, melhorar a eficiência econômica do setor e contribuir para o funcionamento mais equilibrado da matriz logística brasileira.

7. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

A análise desenvolvida ao longo deste artigo evidencia que o transporte rodoviário de cargas no Brasil opera em um ambiente caracterizado pela presença simultânea de externalidades relevantes, falhas de mercado e assimetrias institucionais que influenciam de maneira significativa a formação de preços, a organização da oferta e a estrutura competitiva do setor.

A matriz logística brasileira apresenta forte predominância do transporte rodoviário, resultado de um conjunto de fatores históricos, institucionais e econômicos. No entanto, essa predominância não pode ser explicada apenas por características técnicas ou operacionais do modal. Parte importante dessa dinâmica decorre de distorções associadas à forma como os custos econômicos e sociais da atividade são distribuídos entre os diferentes agentes envolvidos no sistema de transportes.

A presença de externalidades associadas ao transporte rodoviário de cargas (incluindo desgaste da infraestrutura, riscos à segurança viária, impactos ambientais e custos sociais relacionados às condições de trabalho dos motoristas) contribui para que parcela relevante desses custos não seja plenamente incorporada à formação dos preços observados no mercado de fretes. Como consequência, o sistema tende a apresentar uma subprecificação estrutural do transporte rodoviário, favorecendo sua utilização mesmo em situações nas quais outros modais poderiam oferecer soluções logísticas mais eficientes do ponto de vista econômico e sistêmico.

Esse processo gera uma série de efeitos cumulativos sobre o funcionamento do mercado. A competição entre transportadores passa a ocorrer, em parte, por meio da redução de custos sociais não precificados, criando incentivos para práticas operacionais que ampliam externalidades negativas, como jornadas excessivas de trabalho, manutenção inadequada da frota ou transporte de cargas acima dos limites regulamentares. Paralelamente, a baixa barreira de entrada característica do setor contribui para a formação de um excesso estrutural de capacidade, intensificando a pressão competitiva sobre os preços de frete e reforçando a dinâmica de subprecificação da atividade.

Essas distorções não afetam apenas o funcionamento do mercado de transporte rodoviário. Elas produzem efeitos mais amplos sobre a eficiência da matriz logística brasileira, influenciando decisões de investimento em infraestrutura, a escolha modal na movimentação de cargas e a própria

organização das cadeias logísticas no país. Ao favorecer sistematicamente a utilização do transporte rodoviário, mesmo em contextos nos quais soluções intermodais poderiam ser economicamente mais eficientes, esse conjunto de fatores contribui para elevar o custo logístico agregado da economia brasileira e ampliar a pressão sobre a infraestrutura rodoviária.

A análise realizada neste artigo também evidencia que parte dessas distorções está associada a limitações institucionais relacionadas à fiscalização e ao monitoramento das condições de operação da atividade. Em um setor caracterizado por elevado número de operadores independentes, grande dispersão geográfica das operações e significativa heterogeneidade nas condições de operação dos transportadores, a implementação efetiva de normas relacionadas à segurança, à manutenção da frota, à jornada de trabalho e ao cumprimento de requisitos técnicos enfrenta desafios operacionais relevantes.

Nesse contexto, políticas públicas voltadas ao setor precisam atuar simultaneamente sobre diferentes dimensões do problema. A redução das externalidades associadas ao transporte rodoviário de cargas requer não apenas instrumentos voltados à regulação das condições operacionais da atividade, mas também mecanismos capazes de promover a internalização progressiva dos custos sociais da operação na formação de preços do transporte.

Entre os instrumentos atualmente existentes, a política de preços mínimos de frete pode ser interpretada como uma resposta institucional a um ambiente de mercado caracterizado por falhas estruturais e externalidades relevantes. Ao estabelecer um piso para a remuneração do transporte, esse mecanismo contribui para limitar os efeitos mais extremos da subprecificação do frete rodoviário, funcionando como instrumento de estabilização do mercado, enquanto outras políticas estruturais voltadas à correção das distorções existentes são implementadas.

De forma semelhante, políticas voltadas à renovação da frota de veículos podem desempenhar papel relevante na melhoria das condições operacionais do setor, contribuindo para ganhos de eficiência energética, redução de emissões e aumento da segurança viária. No entanto, para que esses benefícios se materializem plenamente, é fundamental que tais políticas estejam associadas a mecanismos que garantam a retirada efetiva de veículos antigos de circulação, evitando que incentivos à aquisição de novos caminhões resultem simplesmente na ampliação da capacidade total do setor e no agravamento do excesso estrutural de oferta.

Considerados em conjunto, os elementos analisados ao longo deste artigo indicam que a construção de um ambiente institucional mais equilibrado para o transporte rodoviário de cargas depende de uma abordagem sistêmica, capaz de enfrentar simultaneamente as diferentes fontes de externalidades e falhas de mercado presentes no setor.

A redução dessas distorções constitui condição essencial para que a formação de preços no mercado de fretes possa refletir de maneira mais adequada os custos econômicos reais da atividade, permitindo que a competição entre operadores ocorra com base em ganhos de eficiência produtiva e não na transferência de custos sociais para terceiros.

Nesse processo, iniciativas voltadas ao fortalecimento da fiscalização da política de fretes mínimos e à criação de mecanismos que associem a renovação da frota à retirada efetiva de veículos antigos de circulação representam passos iniciais relevantes dentro de uma agenda mais ampla de aperfeiçoamento institucional do setor. Essas medidas podem contribuir para mitigar distorções atualmente presentes no mercado, criando condições para uma evolução gradual em direção a um ambiente competitivo mais equilibrado, eficiente e sustentável.

Recomenda-se, portanto, um conjunto de temas prioritários que podem orientar a agenda de construção de políticas públicas. Esses temas estão diretamente relacionados à redução de externalidades associadas ao transporte rodoviário de cargas, ao aperfeiçoamento do ambiente competitivo do setor e à melhoria da eficiência sistêmica da matriz logística brasileira, tais como:

- Fortalecimento da fiscalização da política de fretes mínimos, garantindo maior efetividade do instrumento enquanto persistirem externalidades relevantes e distorções na formação de preços do transporte rodoviário.

- Estruturação de mecanismos institucionais que vinculem programas de renovação de frota ao sucateamento de veículos antigos, evitando que incentivos à aquisição de novos caminhões resultem em ampliação da capacidade total do setor e agravamento do excesso estrutural de oferta.

- Desenvolvimento de mecanismos econômicos que incentivem a provisão para renovação da frota, estimulando transportadores a internalizar os custos de depreciação e substituição de veículos ao longo do ciclo econômico da atividade.

- Fortalecimento da fiscalização da jornada de trabalho e dos períodos de descanso dos motoristas, com utilização de instrumentos tecnológicos de monitoramento e maior integração entre órgãos de fiscalização.

- Ampliação da infraestrutura de pontos de parada e descanso nas rodovias, condição essencial para a efetividade da legislação relacionada à jornada de trabalho e à segurança viária.

- Aprimoramento dos sistemas de fiscalização das condições técnicas da frota, incluindo inspeção veicular periódica, rastreabilidade da manutenção e integração de bases de dados entre órgãos reguladores.

- Fortalecimento dos mecanismos de controle do excesso de peso transportado, com ampliação de sistemas de pesagem automatizada e integração de dados entre autoridades rodoviárias e concessionárias de infraestrutura.

- Redução da informalidade nas operações de transporte rodoviário, com incentivo à formalização contratual do frete, digitalização de documentos de transporte e integração de sistemas de informação logísticos e fiscais.

• Desenvolvimento de sistemas de informação de mercado sobre preços de frete, capazes de reduzir assimetrias de informação e melhorar a transparência nas condições de contratação do transporte.

• Promoção da intermodalidade e da integração logística entre diferentes modais de transporte, reduzindo distorções institucionais que atualmente favorecem o uso excessivo do transporte rodoviário em determinados fluxos logísticos.

• Aprimoramento dos instrumentos de internalização dos custos de uso da infraestrutura rodoviária, incluindo mecanismos de precificação que reflitam de forma mais adequada o impacto do transporte pesado sobre a durabilidade das rodovias.

• Desenvolvimento de políticas voltadas à redução das externalidades ambientais associadas ao transporte rodoviário, incluindo incentivos à eficiência energética e à modernização tecnológica da frota.

• Fortalecimento da coordenação institucional entre órgãos reguladores, autoridades de transporte e formuladores de política pública, de modo a promover uma abordagem sistêmica para a redução das externalidades associadas ao transporte de cargas.

BIBLIOGRAFIA

AGÊNCIA NACIONAL DE TRANSPORTES TERRESTRES (ANTT). **Registro Nacional de Transportadores Rodoviários de Cargas (RNTRC)**. Disponível em: https://portal.antt.gov.br/rntrc. Acesso em: abr. 2026.

AMERICAN TRANSPORTATION RESEARCH INSTITUTE. **An Analysis of the Operational Costs of Trucking**. Arlington, VA: American Transportation Research Institute, 2023.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE (CNT). Pesquisa CNT **Perfil do Caminhoneiro**. Brasília: CNT, 2019.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE (CNT). **Perfil e preferências dos caminhoneiros 2025**. Brasília: CNT, 2025.

EUROSTAT. Road Freight Transport Statistics. Luxembourg: European Commission, Eurostat, 2023.

FRAGOSO JUNIOR, Ademar; GARCIA, Eduardo Garcia. **Transporte rodoviário de carga: acidentes de trabalho fatais e fiscalização trabalhista**. Revista Brasileira de Saúde Ocupacional, v. 44, e3, 2019. DOI: https://doi.org/10.1590/2317-6369000018317.

INFRA S.A. **Plano de Transporte Intermodal (PIT)**. Disponível em: https://pit.infrasa.gov.br/. Acesso em: abr. 2026.

LEYTON, V. et al. **Use of amphetamines by truck drivers in Brazil**. Revista Brasileira de Psiquiatria, São Paulo.

MORENO, C. R. C. et al. **Estudos sobre sono, fadiga e trabalho de caminhoneiros**. São Paulo: Universidade de São Paulo; Universidade Federal de São Paulo.

POLÍCIA RODOVIÁRIA FEDERAL (PRF). **Relatórios estatísticos de acidentes em rodovias federais**. Brasília: PRF.

SILVEIRA, Márcio Rogério. **Logística, sistemas de movimento, fluxos econômicos e interações espaciais no território paulista: uma abordagem para a Geografia dos Transportes e Circulação**. Scripta Nova – Revista Electrónica de Geografía y Ciencias Sociales, Barcelona: Universidad de Barcelona, v. 13, n. 283, 2009.

ARTICLE 2

BRAZIL'S PERVERSE STRUCTURAL ROAD FREIGHT TRANSPORT CYCLE: EXTERNAL FACTORS, MARKET FLAWS, AND FREIGHT TRANSPORT MATRIX EFFICIENCY

Luis Claudio Santana Montenegro (Neowise Consultoria), Rodrigo Tavares Paiva (Graf Consulting) e Ana Carolina Capanema Alves

RESUMO

O artigo analisa o transporte rodoviário de cargas no Brasil a partir de uma abordagem integrada entre externalidades, falhas de mercado e estrutura institucional, examinando seus efeitos sobre a formação de preços e a eficiência da matriz logística nacional. Argumenta que a predominância do modal rodoviário está associada à não internalização de custos sociais, como impactos sobre a infraestrutura, a segurança viária, o meio ambiente e as condições de trabalho, o que leva à subprecificação estrutural do frete. O estudo evidencia que a combinação entre baixa barreira de entrada, elevada fragmentação da oferta e falhas de fiscalização gera excesso de capacidade e competição baseada na transferência de custos para a sociedade. Como consequência, há impactos sistêmicos na matriz de transportes, com desincentivo à intermodalidade e redução da eficiência econômica. Por fim, o trabalho examina o papel de políticas institucionais, como o frete mínimo, e propõe uma agenda de ações voltadas à internalização de custos, ao fortalecimento da fiscalização e à promoção de um ambiente competitivo mais equilibrado, além da redução da informalidade, aprimoramento dos mecanismos de fiscalização, monitoramento e integração entre modais.

Palavras-chave: transporte rodoviário de cargas; falhas de mercado; subprecificação do frete.

ABSTRACT

The article analyzes road freight transport in Brazil through an integrated approach that combines externalities, market failures, and institutional structure, examining their effects on price formation and the efficiency of the national logistics matrix. It argues that the predominance of the road mode is associated with the non-internalization of social costs, including impacts on infrastructure, road safety, the environment, and working conditions, leading to a structural underpricing of freight rates. The study shows that the combination of low barriers to entry, high supply fragmentation, and enforcement shortcomings results in excess capacity and competition based on shifting costs to society. As a consequence, systemic impacts arise in the transport matrix, discouraging intermodality and reducing economic efficiency. Finally, the paper examines the role of institutional policies, such as minimum freight rates, and proposes a policy agenda aimed at cost internalization, strengthening enforcement, and promoting a more balanced competitive environment, as well as reducing informality and improving monitoring, enforcement mechanisms, and modal integration.

Keywords: road freight transport, market failures, freight underpricing.

1. INTRODUCTION

Freight transport plays a key role in the economic health of countries with large territorial footprints. In Brazil, these activities are even more important, due to their continent-wide scope, with widely scattered production hubs whose competitiveness relies heavily on distribution chain logistics. In this context, transport matrix efficiency is a crucial driver of economic development, with lower logistics costs and tighter territorial integration.

Despite its importance, Brazil's freight transport matrix is heavily focused on road options. Historically, trucks have hauled most of the nation's cargoes, playing predominant roles over both short and long distances. Buttressed not only by geographical and production characteristics, this dominance also reflects structural and institutional factors that influence the operational dynamics of this sector.

In recent years, studies and diagnoses have noted that road freight transport market operations are undermined by a significant set of negative external factors and market flaws. These external factors include costs associated with road safety, public health impacts, highway infrastructure wear and tear, environmental effects, and assorted logistical inefficiencies. Many of these costs are not fully absorbed by economic agents rendering transport services, assigned instead to either society in general or the public sector.

When external factors of this type are not adequately absorbed, consequences soon appear through rates that do not reflect the total economic costs of these activities. Under these circumstances, private production and consumption decisions tend to move away from socially efficient levels, giving rise to allocative distortions and systemic effects on the organisation of their economies. For freight transport, this phenomenon may sway mode choices and affect infrastructure investment dynamics, propping up a logistics matrix that is less efficient than alternatives where competition is evenly balanced among modes.

In addition to external factors associated with actual road transport operations, institutional and regulatory aspects also play relevant roles in shaping this context. Issues related to this sector's oversight capacities, compliance with operating rules, and cargo fleet expansion dynamics all interact with structural market characteristics, while possibly deepening economic and competitive distortions.

In this context, it is vital to conduct integrated analyses of the many different factors that influence the road freight transport operations in Brazil. More than just examining certain regulatory instruments or specific policies in isolation, it is necessary to understand the systemic logic underpinning this market structure, as well as external factors generated by these activities, market flaws linked to this environment, and the consequences of these dynamics for Brazil's logistics matrix.

This paper strives to contribute to this analysis, by presenting a set of conceptual arguments and empirical evidence explaining how certain structural road transport characteristics may generate relevant external factors and broad-ranging economic distortions. Throughout this paper, analytical elements help explain how these dynamics may alter the competitive balance between different modes of transport, thus affecting the systemic efficiency of Brazil's logistics matrix.

In this process, it also examines some specific institutional aspects that steer the functioning of this sector, which are part of the broader context of these distortions. Such aspects do not exhaust the set of factors influencing freight transport system performances, but rather indicate important elements within the general logic framework analysed in this study.

Through this approach, this paper strives to provide a structured analytical basis for Brazilian freight transport public policy discussions, thus contributing to a better understanding of the economic, institutional, and competitive dynamics shaping this sector.

2. ECONOMIC STRUCTURE AND PREDOMINANCE OF ROAD FREIGHT TRANSPORT IN BRAZIL

Road freight transport holds a key position in Brazil's logistics matrix. According to the 2050 National Logistics Plan (PNL 2050),[1] drawn up by the Planning and Logistics Enterprise (EPL), some 65% of Brazilian cargoes – measured in TKU (useful tonne-kilometre) – are trucked by road. Rail transport accounts for about 21% of the nation's logistics matrix, while waterborne modes carry around 12%; other options handle only negligible quantities of cargoes. This configuration confirms a transport matrix that is heavily concentrated on roads, in sharp contrast to other large-scale economies, where railways and waterways tend to be substantially more significant, especially for long-distance and high-volume logistics flows.

The forward-looking scenarios presented in the 2050 PNL explore gradual restructuring options for Brazil's logistics matrix during the next few decades. In scenarios foreseeing greater systemic efficiency, road transport shares could shrink to around 50% of the freight transport matrix, with rail reaching about 30%. and waterborne options handling some 18% of total cargo flows, measured in TKU. These projections reflect an awareness in national logistics planning that the current transport to matrix configuration is imposing significant costs on the Brazilian economy and its logistics system. The magnitude of the projected changes shows that significant efforts are still required to bring its logistics matrix closer to a better balanced and more efficient arrangement, from the economic, operational and environmental standpoints.

In countries such as the USA, Canada, Russia, and China, road transport plays an important role, particularly for short and medium distance operations, as well as the capillary distribution of logistics chains. On the other hand, long-distance and high-volume flows are usually handled more intensively by energy-efficient options such as railways and waterways, which are also more economically effective for bulk shipments.

However, road transport still plays a dominant role in Brazil, even for long-distance logistics operations and in production chains carrying huge cargo volumes, particularly for sectors such as agribusiness, mining, and heavy industry. As a result, Brazil's transport matrix is tightly focused on a single mode, limiting the systemic efficiency potential of its logistics systems.

1. https://pit.infrasa.gov.br/ (consulted in April 2026).

The predominance of road transport in Brazil's cargo matrix results from a historical process dating back mainly to the second half of the XX century. During this period, public policies fostering industrialisation and territorial integration drove massive investments into highway infrastructures and encouraged automobile industry expansion. During the next few decades, this development model firmed up Brazil's highway network as the main support for nationwide shipments of goods and commodities.

This approach helped build a logistics system where trucks became the first-choice solution for most production chains. Even in situations where other modes offered advantages such as lower costs or energy efficiency, infrastructure availability and logistics chain structures often kept road transport as the preferred mode.

Part of this predominance is also explained by toad mode operating characteristics. The extensive capillarity of Brazil's highway network ensures direct access to countless origins and destinations, while truck operations offer high logistical flexibility. This flexibility allows relatively quick adjustments to variations in transport demands, with easy integration among different production chain stages.

However, in addition to its importance in the logistics matrix, road freight transport is endowed with specific structural characteristics that influence the competitive dynamics of this sector, together with freight rate formation.

One of these characteristics is high supply fragmentation levels. This market includes crowds of carriers, including self-employed truckers, small haulage companies, and many different sizes of logistics operators. Data released by Brazil's Land Transport Regulator (ANTT) indicate that hundreds of thousands of hauliers are listed on the National Road Cargo Carriers Registry (RNTRC),[2] with a significant portion consisting of self-employed hauliers.

This highly fragmented structure curtails coordination possibilities for freight forwarders, instead ramping up rate-based competition. In markets with throngs of vendors and weak collective coordination capabilities, rate formation often occurs under harsh competitive pressures, where carriers battle to fill their vehicles, even with leaner margins.

Another relevant aspect concerns barriers to entry for these activities. Compared to infrastructure-intensive modes such as railways or ports, road transport has significantly lower barriers to entry. Trucks can be purchased easily through either self-funding or financing, thus allowing individuals or small businesses to enter this market relatively quickly.

This characteristic means that transport capacity supplies are highly sensitive to economic conditions and vehicle acquisition incentives. When credit is easily available or during fleet renewal incentive programmes, the number of trucks on the road may soar.

When fleet expansion outstrips transport demand growth, idle installed capacity might rise. In these circumstances, competition for available cargoes grows even keener, pumping up market pressures on freight rates.

The operating dynamics of road transport in Brazil add further details to this picture. A significant proportion of trips involve deadhead mileage, when trucks travel empty. Adversely affecting average fleet productivity, this operational idleness also influences cost structures in this sector.

2. https://portal.antt.gov.br/rntrc (consulted in April 2026).

In terms of efficiency, specialised scientific literature converges on a typical international range of 15% to 25% deadheading for road freight activities, considered compatible with relatively efficient logistics systems (AMERICAN TRANSPORT RESEARCH INSTITUTE, 2023; EUROSTAT, 20233).

However, studies indicate significantly higher levels of operational idleness in Brazil. Research by Silveira (2009)4 indicates that 46% of trucks in São Paulo State are driving empty, reflecting a marked imbalance between outbound and inbound flows in this logistics system. This study also notes that 50% of the cargoes handled in this State originate and are delivered in the sprawling São Paulo Metropolitan Region, with 92% of them transported on trucks. These factors contribute to a tighter spatial concentration of cargo flows, with more empty vehicles on the road (SILVEIRA, 2009).

Furthermore, this sector presents widespread heterogeneity among economic agents. Self-employed hauliers often work with cost structures, management tiers, and financing access that differs widely from larger corporate carriers. This diversity of profiles ratchets up the complexity of the competitive environment and may influence the way some costs are considered in their operating decisions.

Another relevant factor is the institutional conditions associated with the operations of this sector. The multitude of economic agents and the geographical dispersion of their activities make logistics operations oversight and inspection a complex task for regulators and other watchdog agencies. In certain contexts, institutional oversight constraints may interact with the competitive market structure, influencing the economic behaviours of carriers.

The combination of highly fragmented supplies, low barriers to entry, fierce rate competition, and complex operational dynamics creates a setting where some costs associated with these activities might not be fully reflected in freight rate formation. Consequently, some of the economic and social costs incurred through road transport operations may be transferred to other economic agents, the public sector, or even society.

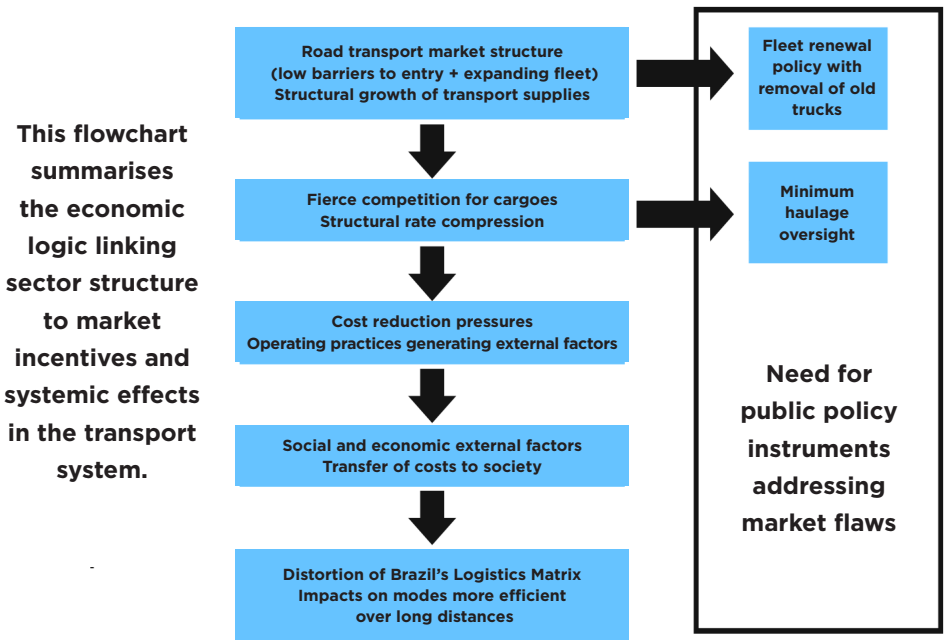
These structural characteristics are crucial for understanding the economic gearing that drives Brazil's road freight sector. They help explain not only the predominance of this mode in the nation's logistics matrix, but also the incentives and behaviours that drive the competitive dynamics of this sector.

Understanding this context is essential for an analysis of factors associated with road freight transport activities. The following sections examine some of the external factors generated by these activities in greater detail, together with their economic, social and institutional implications for the functioning of Brazil's transport system and the efficiency of its logistics matrix.

The following flowchart summarises the economic logic linking the structure of this sector to market incentives, with the resulting systemic effects on Brazil's transport system.

3. AMERICAN TRANSPORTATION RESEARCH INSTITUTE. An Analysis of the Operational Costs of Trucking. Arlington, VA: American Transportation Research Institute, 2023.
EUROSTAT. Road Freight Transport Statistics. Luxembourg: European Commission, Eurostat, 2023.
4. SILVEIRA, Márcio Rogério. Logística, sistemas de movimento, fluxos econômicos e interações espaciais no território paulista: uma abordagem para a Geografia dos Transportes e Circulação. Scripta Nova – Revista Electrónica de Geografía y Ciencias Sociales. Barcelona: Universidad de Barcelona, v. 13, n. 283, 2009.

Figure 1. Perverse Flow Distortion in Brazil's Logistics Matrix



Source: Prepared by the author

3. EXTERNALIDADES DO TRANSPORTE RODOVIÁRIO DE CARGAS E SUAS CONSEQUÊNCIAS SISTÊMICAS

Economic analyses of freight transport markets often use the concept of external factors to understand the impacts of certain production activities on third parties or for society as a whole. External factors occur when the costs or benefits of an economic activity are not fully reflected in market rates or in the individual decisions of the agents involved.

The presence of external factors is particularly important for the road freight transport sector, due to its significant role in Brazil's logistics matrix and the operating characteristics of this sector. When certain minimum operating rules are not fully observed – such as adequate fleet maintenance, respect for workday durations, compliance with weight limits, and formal licensing for operations – some of the costs associated with these activities are no longer absorbed by carriers, but are instead transferred to society, the public sector, or other economic agents.

Presented below is an analytical matrix that shows the main operating behaviours, the external factors they generate, and their respective systemic impacts.

Table 1. External factors and Impacts of Road Freight Transport Activities in Brazil

Category	Generated behaviour	External factor	Systemic impact
Road safety	Lack of fleet maintenance	Increased likelihood of mechanical failures	More road accidents
Road safety	Worn tires and brake systems	Reduced braking capacity	More serious accidents
Road safety	Overly long working hours	Trucker fatigue	Increased likelihood of accidents
Road safety	Excess weight in vehicles	Loss of stability and control	More serious accidents
Infrastructure	Overweight cargos	Rapid deterioration of paved surfaces	Increased highway maintenance costs
Infrastructure	Recurring overweight	Reduced useful life of highway infrastructure	More public spending on highway rehabilitation
Infrastructure	Use of aging fleet	Heavier structural impacts on paved surfaces	Increased highway maintenance costs
Environmental	Old and technologically outdated fleet	Higher pollutant emissions	Impacts on air quality
Environmental	Old and inefficient engines	Higher fuel consumption	Higher CO_2 emissions
Environmental	Diesel particulate emissions	Air pollution	Public health impacts in urban areas
Cost-effective	No allowance for depreciation	Progressive fleet scrapping	Lower productivity in this sector
Cost-effective	Acceptance of freight rates below economic cost	Transport under-pricing	Predatory competition
Cost-effective	Trips with extremely low rates of return	Structural rate compression	Weaker economic sustainability
Market	Low barriers to entry	Excessive inflow of carriers	Excess transport supply
Market	Hauliers with no technical qualifications	Low operating efficiency	Increased operating risks
Oversight	Unlicensed activities in operations	Tax evasion	Lower government revenues
Oversight	Absence of formal contracts	Oversight difficulties	Higher administrative costs
Public health	Overly long working hours	Occupational diseases	Social security and welfare costs
Public health	Chronic fatigue among truckers	Time off work	Impacts on social security system
National logistics	Artificially low road freight rates	Transport matrix distortion	Underuse of railways and waterways
National logistics	Competition based only on rates	Excessive use of road transport	Systemic logistics inefficiencies
National competitiveness	Under-pricing of road freight rates	Discouragement of investments in other modes	Weaker logistics efficiency for Brazil

Source: Prepared by the author

The first tier of external factors refers to road safety. Poor vehicle maintenance, smooth tires, worn brakes, overly long working hours and heavier cargoes than permitted ratchet up traffic accident risks. These events cause significant social impacts, including loss of life, serious injuries, hospital costs, and traffic flow disruptions. Significant portions of these costs are absorbed by the government health network, insurance systems, and society at large.

The social costs associated with road accidents are also significant. Estimates released by the Applied Economic Research Institute (IPEA) indicate that the total cost of traffic accidents in Brazil topped BRL 40 billion in 2014, for federal, state and municipal highways. In this context, the estimated average cost of a fatal accident was about BRL 647,000 (FRAGOSO JUNIOR; GARCIA, 2019)5.

During the period analysed by this study (2008-2012), road freight transport was notable among the economic activities with the highest number of fatal work accidents in Brazil, recording 1,430 deaths from occupational accidents, equivalent to 10.4% of all fatal occupational accidents nationwide. The average mortality rate in this sector was 37.97 deaths per 100,000 employment contracts, one of the highest among the economic activities analysed.

Another important aspect involves impacts on highway infrastructure. Overweight cargos speed up wear and tear on paved surfaces, thus shortening the useful life of highways. Heavy cargo vehicles exert exponential impacts on paved surfaces, so minor variations in cargo weights can cause significant infrastructure deterioration. This phenomenon results in heavier government spending on highway maintenance and rehabilitation, with increased highway concession costs.

In the environmental field, aging and technologically outdated fleets pump out more air pollutants and greenhouse gas emissions. Often diesel fuelled, older engines consume more fuel and emit more carbon dioxide, particulates, and other pollutants. These impacts directly affect air quality, with significant consequences for the health of the Brazilian people.

Environmental and energy impacts are associated with pollutant emissions and heavy fossil fuel consumption. In 2023, Brazil's total diesel demands reached 58.2 billion litres, of which 46.2 billion litres were earmarked for road transport, with some 34.6 billion litres consumed specifically by road freight shipments. At an average price of BRL 5.80 per litre, this corresponds to estimated total expenditures of BRL 200.8 billion on fuels by this sector (GO ASSOCIADOS, 2026).

External factors are also apparent in the economic and operational areas of this sector. The absence of adequate fleet depreciation provisions may lead to scrapped vehicles and lower transport productivity. Acceptance of freight rates below the real economic cost of these activities, together with extremely low return rates, tends to force freight rates down across the board, driving predatory competition in this sector.

Within the market structure, low barriers to entry encourage inflows of new hauliers, often without technical preparation or adequate management capabilities. This phenomenon may lead to an oversupply of transport, stepping up competition based solely on rates and encouraging operating

5. FRAGOSO JUNIOR, Ademar; GARCIA, Eduardo Garcia. Transporte rodoviário de carga: acidentes de trabalho fatais e fiscalização trabalhista. Revista Brasileira de Saúde Ocupacional, v. 44, e3, 2019. DOI: https://doi.org/10.1590/2317-6369000018317

practices that prune costs, in exchange for higher risks and lower efficiency.

Additional external factors arise in the oversight and institutional spheres. Unlicensed transport activities and the absence of formal contracts hamper oversight and inspection of these operations, while fostering tax evasion and lowering government revenues. At the same time, these conditions increase the administrative costs incurred through the oversight and regulation of this sector.

There are also external factors of a fiscal and institutional nature, related to the difficulty of fully absorbing all regulatory, operating, oversight and inspection costs associated with these activities. Based on an analysis of data released by the Federal Revenue Bureau, ANTT, IBGE, ANP and other government databases, GO ASSOCIADOS (2026) estimates that tax evasion associated with road freight transport activities in Brazil ranges between BRL 31.3 billion and BRL 34.1 billion a year, with the average annual value for lost government revenues hovering close to BRL 32.7 billion.

A breakdown of these tax losses indicates that some BRL 11.5 billion correspond to uncollected social security dues, and about BRL 10.2 billion refer to state taxes, mainly the State Goods and Services Circulation (ICMS) Tax, while BRL 7.6 billion are federal taxes and about BRL 3.4 billion are municipal taxes. These figures illustrate the extent to which unlicensed haulage activities are a problem not only within the road transport sector, but are also a major fiscal balance issue, with ripple effects on social security financing (GO ASSOCIADOS, 2026).

In the public health and working conditions field, overly long working hours and chronic fatigue among professional truckers can lead to occupational diseases, sick leaves, and higher accident rates. These effects result in additional costs for Brazil's social security system and public health network.

It is estimated that some 1.9 million people work directly in this sector, including professional truckers, self-employed hauliers, and transport company employees. This cohort highlights the importance of Brazil's road freight sector for its economy and the nationwide shipments of goods and commodities (NATIONAL TRANSPORT CONFEDERATION, 2025)[6].

Research into the working conditions of truck truckers indicates that these activities are characterised by long hours on the road, often associated with high fatigue levels. Conducted by the National Transport Confederation, the CNT Truck Trucker Profile Survey (2019) shows that 61.1% of truckers spend more than nine hours a day behind the wheel, while 43.2% say they have driven when severely fatigued or sleep-deprived; 27.7% report having dozed off behind the wheel at some point in their career. These data confirm the recurrent presence of fatigue in this profession (NATIONAL TRANSPORT CONFEDERATION, 2019)[7].

Academic studies conducted by researchers from the University of São Paulo (USP) and São Paulo Federal University (UNIFESP) endorse this diagnosis. According to these surveys, 71% of truckers spend more than ten hours a day behind the wheel, 37% report frequent episodes of drowsiness when driving, and 27% admit their involvement in accidents associated with fatigue (MORENO et al.).[8]

6. NATIONAL TRANSPORT CONFEDERATION (CNT). Perfil e preferências dos caminhoneiros 2025. Brasília: CNT, 2025.
7. NATIONAL TRANSPORT CONFEDERATION (CNT). Pesquisa CNT Perfil do Caminhoneiro. Brasília: CNT, 2019
8. MORENO, C. R. C. et al. Estudos sobre sono, fadiga e trabalho de caminhoneiros. São Paulo: Universidade de São Paulo; Universidade Federal de São Paulo.

Data released by the Federal Highway Police (PRF) indicate that fatigue-related human factors also bear significant weight in road accidents. Surveys by this institution show that driver fatigue or drowsiness is present in around 21% of serious accidents involving trucks on Brazil's federal highways (FEDERAL HIGHWAY POLICE).[9]

Another relevant aspect associated with long working hours is the use of stimulants to extend driving times. Studies conducted by Leyton et al. indicate that about 30% of truck truckers report using amphetamines (speed shots called rebites) to stay awake during long trips. This practice is often associated with trips requiring more than twelve hours of driving (LEYTON et al.).[10]

Considered as a whole, these external factors have structural consequences on the functioning of Brazil's logistics system. One of the most severe effects occurs when road freight rates are systematically underpriced in relation to their real economic costs. In this situation, road transport may appear to be cheaper than it really is, compared to other modes.

This phenomenon can lead to the use of road transport in situations where other modes (railways, coastal shipping, pipelines, and waterways) could offer greater economic efficiency, especially for long-distance or high-volume operations. Consequently, potentially more efficient modes are underused, firming up the position of a logistics matrix that is far too dependent on road options.

This process may also blunt the competitive edge of the Brazilian economy. When road freight rates reflect only some of the costs associated with these activities, investments in alternative modes may become less attractive, hampering the construction of a better balanced and more efficient logistics system.

In brief, external factors associated with road freight transport are not limited to just stand-alone impacts on safety, the environment, or public health. They cause systemic effects that influence the competitive dynamics of the entire sector, as well as freight rate formation, and the framework underpinning Brazil's logistics matrix.

4. ROAD FREIGHT TRANSPORT MARKET FLAWS

An analysis of the factors associated with road freight transport identifies the presence of structural distortions in this market and its operations. From the standpoint of economic theory, these distortions characterise typical market flaw situations, where a competitive balance resulting from individual agent decisions does not necessarily lead to efficient resource allocations for society as a whole.

In ideal competitive markets, rate systems help coordinate decentralised production and consumption decisions, reflecting costs and benefits associated with economic activities. When all relevant costs are absorbed by agents engaging in economic transactions, market equilibrium tends to maximize overall well-being, as rates accurately indicate the economic costs of activities.

However, when some of these costs are transferred to third parties or society,

9. FEDERAL HIGHWAY POLICE (PRF). Relatórios estatísticos de acidentes em rodovias federais. Brasília: PRF.
10. LEYTON, V. et al. Use of amphetamines by truck drivers in Brazil. Brazilian Journal of Psychiatry, São Paulo.

market rates no longer reflect the effective social costs of these activities. In such cases, the competitive balance may become socially inefficient, driving activity levels higher than economically desirable. This phenomenon has been widely acknowledged in economic literature since the classic works of Arthur Pigou on negative external factors.

For the road freight sector, several costs associated with the operations of this system are not fully reflected in its freight rates. For example, these costs include rapid wear and tear on highway infrastructure, traffic accident impacts, environmental effects caused by vehicle emissions, and the impacts on trucker health and working conditions. When these costs are not fully internalised by the agents operating in this market, road freight rates tend to reflect only private operating costs, rather than the total social costs of transport activities

These differences between private and social costs provide economic incentives for the road transport volumes to exceed socially efficient levels. In other words, the rate system starts to signal artificially reduced road transport costs, stimulating more intensive use of this mode, compared to reactions when all social costs are reflected in these rates.

The economic dynamics of this sector are buttressed by another structural characteristic of the road freight transport sector: low barriers to market entry. Unlike other modes whose expansion depends on heavy investments in infrastructure, concessions, and regulatory authorisation pathways, road transport operates within an institutional framework that offers relatively rapid entry for newcomers.

This ease of entry allows this sector to respond quickly to surges in transport demands. In contrast, market exit mechanisms for surplus capacity tend to be slower and more limited, especially when weeding older trucks out of the fleet. As a result, this sector often operates with supply levels higher than contemporaneous transport demands.

This blend of easy entry and slow asset removal often leads to structural surplus capacity in the road transport market. In fragmented markets with many agents, individual investment decisions may lead to suboptimal collective outcomes. Each carrier makes decisions based on individual income expectations, but the aggregate outcome of these decisions may lead to installed capacity levels that are higher than economically efficient.

This phenomenon is often described in the economic literature as an expression of coordination failure in decentralised markets. Even if each agent makes rational decisions at the individual level, the collective outcome may result in the persistence of a balance characterised by oversupply and rate compression.

In contexts with excess capacity, competition among agents tends to occur through rate reductions. When private costs are relatively rigid, these competitive pressures may require additional strategies for lower operating costs.

In a context where some external factors are not fully internalised, part of this cost reduction may involve indirect transfers of risks and costs to third parties, including truckers, highway infrastructure users, and society at large. For example, this process may appear through more intensive fleet utilisation, postponed investments in vehicle maintenance or fleet renewal, and longer working hours for truckers.

Practical difficulties in overseeing and monitoring the minimum criteria for operational safety and economic sustainability of these activities also reinforce this dynamic. In a sector characterised by myriad carriers and widely dispersed operations, effective

supervision capabilities become less effective for checking vehicle operating conditions, compliance with safety standards, and trucker working conditions. This context undermines the power of standards, rules, and regulations that establish threshold requirements for market operations, paving the way for operating practices with lower private costs, but potentially higher social risks, persisting as competitive strategies in certain segments of this sector.

From the economic standpoint, this process generates a type of competition rooted in unpriced social costs, where market rate reductions do not necessarily result from gains in productive efficiency, but from transferring costs to agents outside this market. Consequently, road freight rates may swerve even further away from the effective social costs of these activities, reinforcing the entire transport under-pricing process.

This dynamic is also influenced by institutional and regulatory differences between transport modes. Options such as railways, waterways, and coastal shipping generally operate under regulatory frameworks that involve concessions, authorisations, or infrastructure-intensive investments, often associated with long-term investment commitments and specific regulatory obligations. These institutional regimes tend to impose clearer constraints on supply expansions, with longer and more structured investment horizons.

In turn, road freight transport has a more open and decentralised institutional regime, with greater ease of entry and lighter requirements for structural investment commitments. While this flexibility constitutes a major operating advantage, it also boosts supply volatility, while reinforcing the excess capacity dynamics noted in this sector.

This regulatory asymmetry among modes increases distortions associated with road transport. While infrastructure-intensive modes operate within institutional frameworks that regulate capacity expansion and require long-term investment commitments, road transport has more supply adjustment flexibility, which can ratchet up freight competition in contexts with surplus capacity.

From the standpoint of economic theory, the coexistence of multiple structural distortions may lead to the formation of subpar balances. In these contexts, the mere presence of market competition does not necessarily guarantee efficient results, as rate systems continue to reflect only partially the real economic costs of these activities.

For the road freight transport sector, the combination of negative unabsorbed external factors, structural excess capacity, competition based on unpriced social costs, and institutional asymmetries among modes contributes to the formation of a market balance that, although competitive from a formal standpoint, does not necessarily lead to efficient resource allocations for society as a whole.

This process not only affects the internal dynamics of the sector, but also produces broader effects on the functioning of Brazil's logistics system. By artificially lowering the apparent road transport costs, these distortions may influence decisions on production, investment, and modes throughout the entire logistics chain.

Understanding road freight market flaws is thus a key step for assessing the challenges raised by seeking efficient organisation for Brazil's logistics matrix, together with the development of public policies pursuing more appropriate allocations of the private and social costs of its transport system.

5. EFFECTS ON BRAZIL'S TRANSPORT MATRIX

The economic distortions associated with road freight transport are not limited to the internal dynamics of this market. By affecting rate formation and the conditions of competition among carriers, these distortions also produce broader effects on the functioning of the nation's transport matrix.

In efficient logistics systems, modal distribution tends to reflect the relative economic advantages of each type of freight transport. Capital-intensive modes, such as railways and waterways, tend to be more efficient for long-distance, large-volume operations. In turn, road transport offers greater operational flexibility and tends to play a leading role for shorter distances, regional distribution, and inter-mode integration.

When freight rates adequately reflect the economic costs associated with each mode, logistics systems tend to expand, fuelled by these complementary aspects. However, when certain modes operate under pricing conditions that do not fully reflect the social costs of these activities, mode choices may reflect rate distortions, rather than real gains in efficiency.

For road freight transport in Brazil, a combination of unabsorbed negative external factors, structural excess capacity, and competition based on unpriced social costs, all contribute to artificially reducing apparent road transport costs. Consequently, logistics decisions by freight forwarders, shippers, and carriers are swayed by pricing environments that do not fully reflect the economic costs of different transport alternatives.

This dynamic could lead to more intensive use of road transport in market segments where other modes might offer greater economic efficiency. In particular, large-volume, long-distance cargoes – shipped predominantly by rail or water in many logistics systems – may still be trucked by road when rate gaps among modes do not fully reflect the social costs of each option.

Over time, the persistence of this type of distortion may have cumulative effects on transport matrix arrangements. By artificially lowering apparent road transport costs, economic systems start to generate rate signals that encourage investments, operating decisions, and logistics structures focused more intensively on highways.

This process may sway private decisions on investments in logistics assets, while also influencing production chain line-ups. Companies can structure their supply chains mainly on road-based logistics solutions, even in contexts where intermodal alternatives offer long-term gains in efficiency.

Furthermore, the presence of compressed rates for road transport solutions can indirectly dim the economic appeal of investments in other modes of transport. Railway, waterway, and coastal shipping projects are generally designed for long-term investment horizons, with cargo volumes high enough to ensure their economic feasibility. When road transport operates at artificially low rates, due to unabsorbed external factors, economic comparisons among modes may become distorted, with fewer incentives to develop more efficient logistics solutions in some market segments.

This dynamic can underpin the persistence of a transport matrix that is heavily dependent on road-based options. In Brazil, this characteristic is already mentioned frequently in logistics policy and infrastructure planning analyses, highlighting the large share held by road freight, compared to other large countries.

From an economic standpoint, this configuration may be interpreted as the cumulative outcome of rate signals that do not fully reflect social costs associated with road transport. Over time, these signals influence decentralised decisions on production, investment, and logistics arrangements, helping consolidate a modal structure that may not be the most efficient, in systemic terms.

The effects of these distortions also appear in the dynamics of infrastructure investments. When a logistics matrix becomes excessively dependent on a single mode, pressures on the corresponding infrastructure build up, reflected in problems such as traffic jams, heavier wear and tear on assets, and more frequent maintenance requirements.

In this context, discussions about road freight transport market flaws are not limited to sectoral analyses. These issues are directly connected to discussions on the organisation of Brazil's logistics matrix, the efficiency of its transport system, and the economic conditions that steer public and private infrastructure investment decisions.

Understanding these systemic effects is essential for a broader assessment of the challenges raised by the development of a well-balanced transport matrix, making more efficient use of complementary aspects among different modes while lowering aggregate logistics costs for the economy as whole.

6. INSTITUTIONAL ELEMENTS FOR REDUCING EXTERNAL FACTORS AFFECTING ROAD FREIGHT TRANSPORT

The analysis presented in this paper shows that many of the distortions in Brazil's road freight transport market result from the presence of unabsorbed external factors, institutional asymmetries among modes, and structural difficulties in monitoring baseline operating conditions for these activities. These characteristics shape a competitive environment where some economic agents can operate by transferring part of their costs to third parties, through faster deterioration of highway infrastructure, higher accident risks, and harsher working conditions for truckers, together with the environmental and social impacts arising from these activities.

In markets with these characteristics, freight rate formation tends to reflect only part of the economic costs of these operations. Consequently, a competitive context often develops, driven by unpriced social costs rather than gains in efficiency. This phenomenon tends to result in the structural under-pricing of road transport options, with more severe competitive distortions that buttress the predominance of this mode, even in situations where other solutions would be more efficient.

In this context, public policies for this sector must address two distinct aspects of this problem simultaneously. On the one hand are the external factors associated directly with road transport operations. On the other is the need to establish institutional conditions that ensure market rates reflect the real economic costs of these activities more accurately.

Among the instruments currently in place, the minimum freight rate policy may be construed as an emergency intervention mechanism intended to mitigate the most extreme effects of road mode under-pricing. In a context with a highly fragmented supply side, strongly asymmetrical information, and very similar operating conditions for carriers, competition can shift to aspects related to rate reductions through unabsorbed social costs, such as overly long working hours, inadequate fleet maintenance, and non-compliance with technical safety standards.

In these circumstances, the minimum freight policy serves as a tool for institutional control, establishing a threshold where freight rates become incompatible with minimum economic operating levels for these activities. From the economic theory viewpoint, this mechanism may be ranked as a second-best regulation solution, used in contexts where all the market flaws in this sector cannot be corrected immediately.

This approach deploys the minimum freight rate policy as a transitory measure for stabilising market operations, rather than a permanent rate control solution, while other structural policies are implemented and consolidated, designed to ensure better absorption of external factors arising from these activities.

Reducing dependence on administrative rate control instruments thus requires the construction of an institutional framework able to curb incentives for transferring social costs to third parties. This involves a broad set of public policies that regulate road transport operating conditions, together with oversight of these activities, and structuring economic incentives for this sector.

An initial and important aspect is the regulation of trucker working hours and rest conditions. The specialised literature confirms fatigue as a major factor in accidents involving heavy vehicles. Studies indicate that accident risks rise significantly as unbroken driving times grow longer, multiplying several times after prolonged periods behind the wheel without adequate rest. Remuneration structures based on productivity or trip numbers often establish economic incentives for dangerously long working hours, ratcheting up accident risks and transferring significant social costs to society as a whole, particularly hospital expenses, productivity losses and social security costs.

In this context, stronger oversight and inspection laws for trucker working hours and rest periods are key factors for reducing these external factors. The use of technological tools for monitoring these activities, digital trip recording systems, and the development of adequate highway stop and rest facilities could contribute significantly to enhancing the effectiveness of these regulations.

Another important aspect is oversight of fleet conditions. Competition based on lower operating costs can encourage some agents to cut corners on preventive maintenance, critical component replacements or technological vehicle updates. Practices such as worn tires, erratic brake maintenance, and keeping vehicles on the road despite poor mechanical conditions will increase accident risks while pumping up the social costs associated with road transport.

More stringent vehicle inspection mechanisms, fleet maintenance traceability, and the integrating the oversight systems used by different

government agencies will help iron out these distortions, while fostering a more evenly balanced competitive environment among carriers in this sector.

Another relevant factor is cargo weight control, preventing excessively heavy vehicles. Freaks that exceed regulatory limits are a recurrent problem in several road transport markets, with significant impacts on highway infrastructure durability. Wear and tear on paved surfaces is directly related to axle weight, as systematically transporting loads above regulatory limits can drastically reduce the useful life of highways, with higher infrastructure maintenance costs that are then transferred to society as a whole.

The expansion of automated weighing systems on highways, more robust oversight and inspection structures, and data integration between highway concession holders and regulators are important tools for reducing these external factors.

Another relevant aspect refers to high levels of unlicensed activities in some areas of Brazil's road freight transport market. The absence of formal haulage agreements and the use of informal contracting mechanisms make it hard to monitor fundamental aspects of these activities, particularly labour law compliance, tax collections, working hours controls, and transport operation traceability. These unlicensed activities contribute to even more asymmetrical information on this market, and may lead to artificially competitive advantages for carriers not fully compliant with current regulations.

Policies for digitising transport documents, integrating tax and logistics databases, and encouraging formal trucking contracts can all help reduce these distortions, while endowing this sector with a keener competitive edge.

Another important element is the absence of adequate economic mechanisms that encourage fleet renewal. In many cases, road freight market rate structures fail to include vehicle depreciation, an economic aspect that degrades incentives for carriers to set aside funds for regular fleet replacements. This results in a gradual fleet aging process that has negative impacts on road safety, energy efficiency, and pollution emission levels.

In this context, programmes encouraging fleet renewal can play important roles in sector modernisation. However, such policies must be carefully designed, ensuring that new vehicles entering this market do not simply increase the total capacity of this sector, without requiring the removal of similar numbers of older vehicles. Should this occur, renewal programmes may inadvertently increase the structural surplus capacity already visible in Brazil's road freight transport sector.

This is why effective fleet renewal policies tend to include mechanisms that make access to financial incentives conditional on the permanent withdrawal of old vehicles from the market, avoiding increases in total system capacity while simultaneously contributing to technological fleet modernisation.

Another relevant aspect involves institutional asymmetries among different modes of transport. While options such as railways and waterways often operate under institutional systems that involve long-term investment commitments and well defined regulatory frameworks, road transport offers more flexible entry conditions, with easier capacity expansion. This institutional difference can influence relative rate formation among these modes, buttressing the predominance of road transport in market segments where intermodal logistics solutions might well offer greater economic efficiency.

Policies targeting the development of multimodal logistics corridors, intermodal operations integration, and lower institutional barriers to intermodal solutions can help iron out these distortions, while enhancing the systemic efficiency of Brazil's transport matrix.

Another important element is the information asymmetry of freight markets. In highly fragmented segments crowded with self-employed hauliers, freight forwarders often have incomplete information on effective market conditions, thus hindering efficient rate formation. The development of public or private information systems on freight rates, volumes transported, and market operating conditions could help even out these asymmetries, while endowing this sector with a keener competitive edge.

Taken together, these different institutional instruments point to a broader agenda of public policies striving to lighten the impacts of external factors associated with road freight transport in Brazil. Gradual implementation of these steps will help ensure that the social costs of these activities are steadily absorbed by economic agents, bringing the private operating costs closer to their effective social costs.

As these external factors are reduced or absorbed through regulatory, technological, and institutional tools, freight market rate formation tends to reflect the real economic costs of these activities more accurately. In this context, the need for administrative rate control tools – such as minimum freight rates – becomes steadily less pressing.

From this standpoint, a minimum freight rate policy may be viewed as a transitory market stabilisation tool whose main function is to mitigate the most extreme effects of a distorted competitive environment, while structural policies designed to correct market flaws are developed and consolidated.

The construction of a better-balanced institutional context, where the social costs of these activities are properly absorbed, is thus an essential condition for more efficient and sustainable road freight transport operations over the long term. While enhancing the efficiency of the nation's logistics matrix, this will also help lower the economic and social costs of cargo shipments in Brazil.

In this context, two institutional agendas are particularly relevant, over the short term. One addresses the need for tighter oversight of the minimum freight rate policy. Under current market conditions, this tool plays an important role in curtailing the worst effects of road transport under-pricing. As long as important external factors and structural difficulties persist for monitoring the minimum operating conditions of these activities, the effective application of this mechanism remains an important tool for preventing competition based on transfers of social costs to third parties by this sector.

The other agenda refers to the fleet renewal incentive structure. Programmes pursuing truck fleet modernization can result in significant gains for energy efficiency, road safety, and emission reductions. However, for these benefits to fully materialise, these policies must be associated with mechanisms that ensure the effective removal of old vehicles from the roads. Without instruments for definitively removing or scrapping the older trucks, purchase incentive programmes for new vehicles may simply expand the total capacity of this sector, thus worsening the structural surplus supply situation already apparent in Brazil's road freight transport sector.

Consequently, urging effective oversight for the minimum freight rate policy and the promotion of mechanisms that link fleet renewal to the removal of old vehicles are two specific initial steps that fall within a broader agenda for correcting the structural distortions identified in this paper. Both aspects are consequently appropriate starting points for the construction of public policies able to reduce these external factors and enhance the economic efficiency of this sector, while pursuing better balanced operations for Brazil's logistics matrix.

7. CONCLUSIONS AND RECOMMENDATIONS

The analysis presented in this paper shows that road freight transport in Brazil operates in an environment characterised by the simultaneous presence of relevant external factors, market flaws, and institutional asymmetries that significantly influence rate formation, supply organisation, and the competitive structure of the sector.

Brazil's logistics matrix is heavily dependent on road transport, due to a set of historical, institutional, and economic factors. However, this predominance cannot be explained only by the technical or operating characteristics of this mode. An important aspect of this dynamic stems from distortions associated with the ways in which the economic and social costs of these activities are distributed among the many different agents involved in this transport system.

The presence of external factors associated with road freight transport (including wear and tear on infrastructure, road safety risks, environmental impacts, and social costs related to trucker working conditions) contributes to the fact that significant portions of these costs are not fully included in freight market rate formation. Consequently, the system tends to structurally underprice road transport, thus encouraging its use even in situations in which other modes offer more efficient logistics solutions from an economic and systemic standpoint.

This process gives rise to a set of cumulative effects on the functioning of this market. Competition among carriers depends partially on lowering unpriced social costs, with encouragement for operating practices that amplify external negative factors, such as overly long working hours, inadequate fleet maintenance, and cargoes that exceed regulatory ceilings. At the same time, low barriers to entry that are characteristic of this sector lead to structural surplus capacity, stepping up competitive pressures on freight rates and driving an under-pricing dynamic for these activities.

Adversely affecting not only road transport market operations, these distortions have broader effects on the efficiency of Brazil's logistics matrix, influencing infrastructure investment decisions, mode choice for cargo shipments, and even the structuring of Brazil's logistics chains. By systematically favouring road transport, even in contexts where intermodal solutions could be more economically efficient, this set of factors is raising aggregate logistics costs for the Brazilian economy, while ramping up pressures on highway infrastructures.

The analysis in this paper also shows that some of these distortions are linked to institutional limitations related to oversight and inspection of the operating conditions of these activities. In a sector populated by crowds of self-employed hauliers, widely dispersed operations, and significantly heterogenous operating

conditions for carriers, the effective implementation of rules and regulations related to safety, fleet maintenance, working hours, and compliance with technical requirements faces massive operating challenges.

In this context, public policies for this sector must simultaneously target different aspects of these issues. Reducing external factors associated with road freight transport requires not only tools that regulate the operating conditions of these activities, but also mechanisms encouraging the formation of freight rates that steadily absorb the social costs of these operations.

Among the tools currently in place, the minimum freight rate policy may be viewed as an institutional response to a market environment characterised by structural flaws and significant external factors. By establishing a threshold freight rate, this mechanism helps curtail the worst effects of under-pricing road freights, serving as a market stabilisation tool, while other structural policies are being implemented to correct different distortions.

Similarly, fleet renewal policies can play a relevant role in upgrading the operating conditions of this sector, with more energy efficiency and emission reductions, in parallel to better road safety. However, for these benefits to fully materialise, these policies must be linked to mechanisms that ensure the effective removal of old vehicles, thus ensuring that new truck acquisition incentives do not expand the total capacity of this sector, thus worsening its structural supply surplus.

Considered together, the elements analysed in this paper indicate that the construction of a better balanced institutional environment for road freight transport depends on a systemic approach that simultaneously addresses the sources of the many external factors and market flaws in this sector.

Reducing these distortions is a vital condition for freight market rate formation that more accurately reflects the real economic costs of these activities. This would foster competition among carriers based on better production efficiency, instead of transferring social costs to third parties.

In this process, initiatives designed to strengthen minimum freight rate policy oversight and the introduction of mechanisms linking fleet renewal to the effective removal of old vehicles are important initial steps, within a broader institutional improvement agenda for this sector. These measures can help mitigate distortions currently noted in this market, paving the way for gradual progress towards a better balanced, more efficient, and sustainable competitive environment.

A set of issues tagged as high priority is listed below, as guidelines for a public policy construction agenda. These topics are directly related to reductions in external factors associated with road freight transport, endowing this sector with a keener competitive edge, and enhancing the systemic efficiency of Brazil's logistics matrix:

- Strengthening minimum freight rate policy oversight, ensuring greater effectiveness for as long as significant external factors and distortions persist in road freight rate formation.

- Structuring institutional mechanisms that link fleet renewal programmes to scrapping of old vehicles, ensuring that new truck acquisition incentives do not expand the total capacity of this sector, thus worsening its structural supply surplus.

- Development of economic mechanisms that encourage fleet renewal provisions, with incentives for carriers to absorb vehicle depreciation and replacement costs throughout the economic cycle of these activities.

- Strengthening oversight of trucker working hours and rest periods, through deploying technological monitoring tools, with tighter integration among watchdog agencies.

- Expansion of highway stop and rest facilities, as this infrastructure is essential for the effectiveness of labour legislation regulating working hours and road safety laws.

- Fleet monitoring system upgrades, including regular vehicle inspections, maintenance traceability, and database integration among regulators.

- Strengthening cargo control mechanisms through the expansion of automated weighing systems and data integration for highway authorities and infrastructure concession holders.

- Reduction in unlicensed road transport operations, with incentives for formal freight contracts, digitised transport documents, and integrated logistics and tax information systems.

- Development of market freight rate data systems that can even out information asymmetries and ensure more transparent freight contracting conditions.

- Promotion of intermodal and logistics integration among different modes of transport, reducing institutional distortions that currently encourage excessive use of road transport in some logistics flows.

- Upgraded tools for absorbing highway infrastructure use costs, including pricing mechanisms that better reflect the impacts of heavy loads on highway durability.

- Development of policies designed to reduce environmental external factors associated with road transport, including energy efficiency and fleet modernisation incentives.

- Closer institutional coordination among regulators, transport agencies, and public policy makers, urging a systemic approach to reducing external factors associated with road freight transport.

BIBLIOGRAPHY

AGÊNCIA NACIONAL DE TRANSPORTES TERRESTRES (ANTT). **Registro Nacional de Transportadores Rodoviários de Cargas (RNTRC).** Available at: https://portal.antt.gov.br/rntrc. Accessed: April 2026.

AMERICAN TRANSPORTATION RESEARCH INSTITUTE. **An Analysis of the Operational Costs of Trucking.** Arlington, VA: American Transportation Research Institute, 2023.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE (CNT). Pesquisa CNT **Perfil do Caminhoneiro**. Brasília: CNT, 2019.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE (CNT). **Perfil e preferências dos caminhoneiros 2025.** Brasília: CNT, 2025.

EUROSTAT. **Road Freight Transport Statistics.** Luxembourg: European Commission, Eurostat, 2023.

FRAGOSO JUNIOR, Ademar; GARCIA, Eduardo Garcia. **Transporte rodoviário de carga: acidentes de trabalho fatais e fiscalização trabalhista.** Revista Brasileira de Saúde Ocupacional, v. 44, e3, 2019. DOI: https://doi.org/10.1590/2317-6369000018317.

INFRA S.A. **Plano de Transporte Intermodal (PIT).** Available at: https://pit.infrasa.gov.br/. Accessed: April 2026.

LEYTON, V. et al. **Use of amphetamines by truck drivers in Brazil.** Revista Brasileira de Psiquiatria, São Paulo.

MORENO, C. R. C. et al. **Estudos sobre sono, fadiga e trabalho de caminhoneiros.** São Paulo: Universidade de São Paulo; Universidade Federal de São Paulo.

POLÍCIA RODOVIÁRIA FEDERAL (PRF). **Relatórios estatísticos de acidentes em rodovias federais.** Brasília: PRF.

SILVEIRA, Márcio Rogério. **Logística, sistemas de movimento, fluxos econômicos e interações espaciais no território paulista: uma abordagem para a Geografia dos Transportes e Circulação**. Scripta Nova – Revista Electrónica de Geografía y Ciencias Sociales, Barcelona: Universidad de Barcelona, v. 13, n. 283, 2009.

ARTIGO 3

FONTES SUSTENTÁVEIS DE ENERGIA E TECNOLOGIAS DE ARMAZENAMENTO NA AVIAÇÃO: UMA ANÁLISE DE VIABILIDADE

Fabriciu Benini e Matheus Rosa

RESUMO

Nos últimos anos, a indústria da aviação tem intensificado esforços para adotar soluções de propulsão sustentável, impulsionada por pressões ambientais e metas de descarbonização de longo prazo. Este artigo avalia a viabilidade técnica e econômica de fontes de energia e tecnologias de armazenamento alternativas para propulsão de aeronaves, focando em Combustíveis Sustentáveis de Aviação (SAFs), sistemas elétricos a bateria, propulsão a hidrogênio e arquiteturas híbridas-elétricas. Uma análise comparativa e qualitativa foi desenvolvida com base no desempenho energético, impacto ambiental, requisitos de infraestrutura, limitações operacionais e custos de ciclo de vida. Avanços recentes na química de baterias, rotas sustentáveis de produção de combustíveis e sistemas baseados em hidrogênio são examinados junto a estudos de caso de demonstradores de aeronaves emergentes. Os resultados indicam que nenhuma tecnologia única atende atualmente a todos os requisitos para aviação comercial de grande escala, reforçando a necessidade de uma estratégia de descarbonização em múltiplas vias combinando SAFs, conceitos híbridos-elétricos e futuras aeronaves elétricas e a hidrogênio.

Palavras-chave: combustíveis sustentáveis de aviação, propulsão elétrica, aeronaves a hidrogênio.

ABSTRACT

In recent years, the aviation industry has intensified efforts to adopt sustainable propulsion solutions driven by environmental pressures and long-term decarbonization goals. This article evaluates the technical and economic feasibility of alternative energy sources and storage technologies for aircraft propulsion, focusing on Sustainable Aviation Fuels (SAFs), battery-electric systems, hydrogen propulsion, and hybrid-electric architectures. A comparative and qualitative analysis was developed based on energy performance, environmental impact, infrastructure requirements, operational limitations, and life-cycle costs. Recent advances in battery chemistry, sustainable fuel production pathways, and hydrogen-based systems are examined alongside case studies of emerging aircraft demonstrators. Results indicate that no single technology currently meets all requirements for large-scale commercial aviation, reinforcing the need for a multi-path decarbonization strategy combining SAFs, hybrid-electric concepts, and future electric and hydrogen-powered aircraft.

Keywords: sustainable aviation fuels, electric propulsion, hydrogen aircraft

INTRODUÇÃO

Embora a aviação viabilize a viagem pelo mundo e contribua com a economia, ela também contribui para as emissões de gases do efeito estufa. A indústria da aviação é responsável por 2–3% do total das emissões de dióxido de carbono globais (LEE et al., 2009). A evolução dos combustíveis com alta emissão de carbonos tem recebido grande atenção do público. Os serviços de aviação buscam novas abordagens para a propulsão ecológica de aeronaves. Embora o querosene de aviação derivado de petróleo seja compacto para viagens de longa distância e melhore a eficiência, ele está totalmente fora de sincronia com as metas ecológicas de longo prazo estabelecidas pelos acordos da CORSIA 'Fit for 55' (WINDHORST et al., 2024) (As propostas fazem parte dos pacotes legislativos 'Fit for 55', que têm como objetivo reduzir as emissões de gases do efeito estufa da UE em pelo menos 55% até 2030). CORSIA é o Esquema de Compensação e Redução de Carbono para a Aviação Internacional, um plano global da Organização da Aviação Civil Internacional (ICAO) para reduzir o crescimento das emissões de dióxido de carbono (CO_2) da aviação internacional. O investimento em tecnologias emergentes deu destaque ao potencial de crescimento ambiental significativo na aviação e nas linhas aéreas através de propelentes elétricos e movidos a hidrogênio, bem como combustíveis sustentáveis de aviação (SAFs) (BEZOS-O'CONNOR, 2023).

Cada alternativa oferece benefícios potenciais, junto com limitações como densidade de energia, escala, peso, infraestrutura e impacto ecológico geral. As baterias de íon-lítio para aviação propiciam emissões zero no ponto de uso. As baterias de íon-lítico (PHAM et al., 2023) para aviação movida por eletricidade, contudo, enfrentam desafios com armazenamento de alto uso de energia e peso. As células de combustível de hidrogênio (LEE et al., 2010), contudo, têm seus inconvenientes. As células de combustível de hidrogênio prometem ser a solução para a alta demanda de energia e o reabastecimento rápido, mas o armazenamento complexo e a ampla distribuição de combustível são os principais fatores limitadores. Este artigo tem o papel fundamental de mostrar as alternativas que já estão sendo utilizadas pela indústria aeronáutica e por estudos em curso que podem revolucionar o mercado. Os SAFs permanecem sendo uma importante solução aplicada (ICAO, 2022), com apoio de estudos e adoção industrial.

2. METODOLOGIA

Este estudo está estruturado como uma revisão integrativa da literatura combinada com uma análise de decisão multicritério qualitativa (MCDA). A pesquisa foi conduzida em duas etapas principais para avaliar a viabilidade técnica e econômica de fontes de energia alternativas para a aviação.

Na primeira etapa, foi realizada uma pesquisa bibliográfica abrangente para mapear os últimos avanços na propulsão sustentável na aviação. A pesquisa utilizou bancos de dados acadêmicos, principalmente o *ScienceDirect* e o *Google Scholar*, junto com relatórios técnicos oficiais de agências reguladoras e associações comerciais, como a Organização da Aviação Civil Internacional (ICAO), a Associação Europeia para a Segurança da Aviação (EASA) e Grupo de Ação do Transporte Aéreo (ATAG). A estratégia da pesquisa empregou combinações de palavras-chave,

incluindo “combustíveis sustentáveis para aviação”, “aviões elétricos”, “propulsão a hidrogênio”, “armazenamento de energia na aviação” e “avaliação do ciclo de vida”. Para assegurar a relevância e a tempestividade dos dados pertinentes à prontidão tecnológica, a seleção priorizou artigos com revisão por pares e relatórios institucionais publicados predominantemente entre 2015 e 2024.

Na segunda etapa, foi desenvolvida uma Matriz de Decisão para comparar sistematicamente a viabilidade das fontes de energia identificadas: Combustíveis Sustentáveis de Aviação (SAFs), sistemas elétricos a bateria e propulsão a hidrogênio. Em vez de empregar uma agregação puramente estatística, que fica fora do âmbito do escopo desta análise qualitativa de viabilidade, os critérios da matriz se originaram diretamente das limitações principais para a descarbonização da aviação comercial destacada na literatura analisada.

Os critérios de avaliação selecionados envolvem Desempenho Energético (Densidade), Impacto Ambiental, Requisitos de Infraestrutura e Custos do Ciclo de Vida. Os pesos atribuídos a cada critério na seção de resultados foram determinados qualitativamente com base no consenso sobre os principais obstáculos identificados na literatura. Por exemplo, as limitações físicas e de segurança – como densidade de energia gravimétrica e limitações operacionais – receberam pesos críticos mais elevados, pois representavam barreiras físicas intransponíveis no projeto de aeronaves, considerando os fatores econômicos e de infraestrutura que, embora significativos, foram tratados como variáveis secundárias escaláveis. Esta estrutura metodológica oferece uma base estruturada e transparente para a análise comparativa qualitativa apresentada na discussão.

2.1 Estrutura comparativa

Uma matriz de comparação foi desenvolvida para avaliar as alternativas de propulsão com base em critérios quantitativos (numéricos) e qualitativos (descritivos).

Tabela 1 – Estrutura comparativa

Critérios	Unidades métricas	Referência
Densidade de energia	Wh/kg	(PROESMANS; VOS, 2022)
Custo operacional	US$/hora	(WINDHORST et al., 2024)
Redução das emissões	% vs Jet-A	(PALLAS; BENARD, 2022)
Custo de manutenção	% de redução	(HÖLZEN et al., 2020)
Nível de ruído	dBA	(LEE et al., 2010)
Disponibilidade de combustível	Produção global (t/ano)	(CILIBERTI et al., 2022)

Esta abordagem está alinhada com o modelo de tomada de decisão sustentável discutido em Rosen & Dincer (2021) dando suporte à estrutura de ponderação usada neste trabalho.

2.2 Abordagem analítica

- A estrutura analítica consiste em três etapas complementares:

- Síntese da literatura: identificar áreas de consenso e divergência entre os estudos anteriores.

- Projeção tecnológica: estimar o progresso da densidade de energia, do custo e da eficiência até 2045 com base na evolução do TRL [*nível de maturidade tecnológica*].

- Avaliação do cenário: estabelecer três horizontes de adoção para a aviação sustentável:

- No curto prazo (2025–2030): expansão da produção de SAF e introdução operacional de eVTOLs [*veículos de pouso e decolagem vertical*] totalmente elétricos.

- No médio prazo (2030–2040): implantação de sistemas híbridos-elétricos e de célula de combustível de hidrogênio para a aviação regional.

- No longo prazo (2040–2050): integração de aeronaves totalmente elétricas e movidas a hidrogênio às frotas comerciais.

- Esses cenários estão alinhados com as estruturas descritas em *Electric Propulsion for Regional Aircraft – Critical Components and Challenges* [Propulsão elétrica para aeronaves regionais - Componentes críticos e desafios] (PRABHAKAR et al., 2022) e *Sustainable Aviation Electrification* [Eletrificação Sustentável da Aviação]: *A Comprehensive Review* [Uma revisão abrangente] (KURNIAWAN; KHARDI, 2011).

3. REVISÃO DA LITERATURA

Esta seção apresenta uma análise crítica do consumo de energia e das fontes que são utilizadas. Ela começa com a contextualização do impacto ambiental no setor aeronáutico, seguida por uma análise das principais fontes sustentáveis de energia aplicáveis à aviação, tecnologias atuais e emergentes de armazenamento de energia, bem como iniciativas do mundo real e estudos de caso. Por fim, ela discute os principais desafios técnicos, econômicos e reguladores que devem ser abordados para permitir uma transição viável para a aviação sustentável nos próximos anos.

A indústria da aviação desempenha um papel fundamental na economia global, responsável por 4,1% do PIB mundial (ATAG, 2019). Nos Estados Unidos, a aviação inclui uma ampla rede de aeroportos, linhas aéreas e fabricantes, e é a principal contribuinte da economia e do sistema nacional de transportes (PALLADINO et al., 2021). Graças ao seu tamanho, não causa surpresa que a aviação seja responsável por 10% das emissões de gases causadores do efeito estufa (GEE) de todo o setor de transportes (ICAO, 2022). A maior parte das emissões da aviação tem origem em motores de propulsão e turbofan: o ar atmosférico (uma mistura de nitrogênio e oxigênio) entra no sistema de propulsão, se mistura ao querosene de aviação – uma mistura complexa de hidrocarbonetos – na câmara de combustão e sofre combustão, produzindo energia junto com CO_2, vapor de água, óxidos de nitrogênio e enxofre, e hidrocarbonetos não queimados (SCHOLZ; MICHELMANN; HORNUNG, 2021).

As emissões da aviação devem aumentar com o crescimento da demanda de viagens aéreas. Depois de uma grave

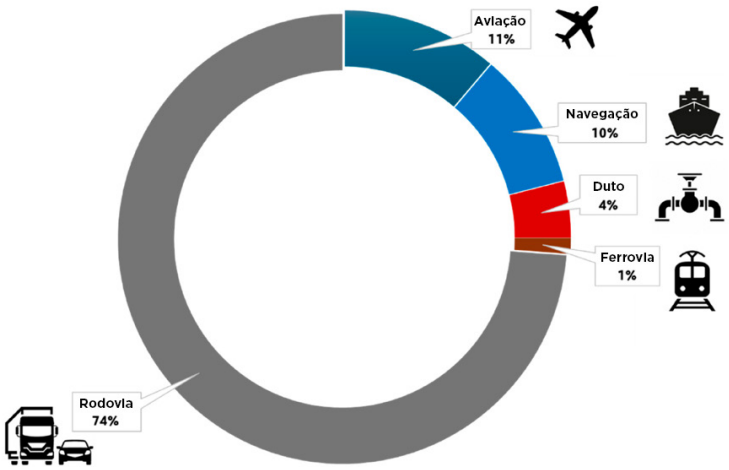
redução durante a pandemia de 2020–2022, o tráfego de passageiros quase voltou aos níveis anteriores à COVID-19 em 2026 (PROESMANS; VOS, 2022). A demanda de passageiros, medida por *Revenue Passanger Miles* (RPM) [Milhas de Passageiros Pagantes] é projetada para aumentar cerca de 3% ao ano pelo menos até 2041, (PROESMANS; VOS, 2022). Até 2050, aproximadamente 10 bilhões de passageiros devem voar. Caso a atual frota opere sem melhorias tecnológicas ou operacionais, a aviação pode emitir aproximadamente 2 Gt de CO2 em 2050 (ICAO, 2022).

Em 2022, o setor de aviação produziu cerca de 1 bilhão de toneladas de CO_2 (LEE et al., 2010), ou quase 2% dos 42 bilhões de toneladas de CO_2 produzidos anualmente pela atividade do homem (WINDHORST et al., 2024). A aviação atualmente é responsável por cerca de 2,0-2,5% das emissões anuais globais de carbono e deverá capturar uma fatia maior se os outros setores descarbonizarem mais rapidamente. A ICAO calcula um crescimento anual médio na demanda por quilômetros de passageiros pagantes (RPKs) de 3,6% de 2018 até 2050, mesmo quando os impactos da pandemia de COVID-19 são levados em consideração.

De acordo com Lee et al. (2021) e a ICAO, as emissões de CO_2 do setor de aviação representam quase 2% do total das emissões antropogênicas globais. Quando estão incluídos efeitos da aviação não relacionados ao CO_2 (como rastros de condensação, ozônio, aerossóis, etc.), o impacto climático do setor aumenta até aproximadamente 3-4% do forçamento radiativo global (ICAO, 2022; LEE et al., 2021).

Recentes avaliações comparativas do ciclo de vida analisaram o desempenho ambiental de diferentes matérias-primas de biomassa para a produção de SAFs (VENKATRAM et al., 2024) (Figura 1).

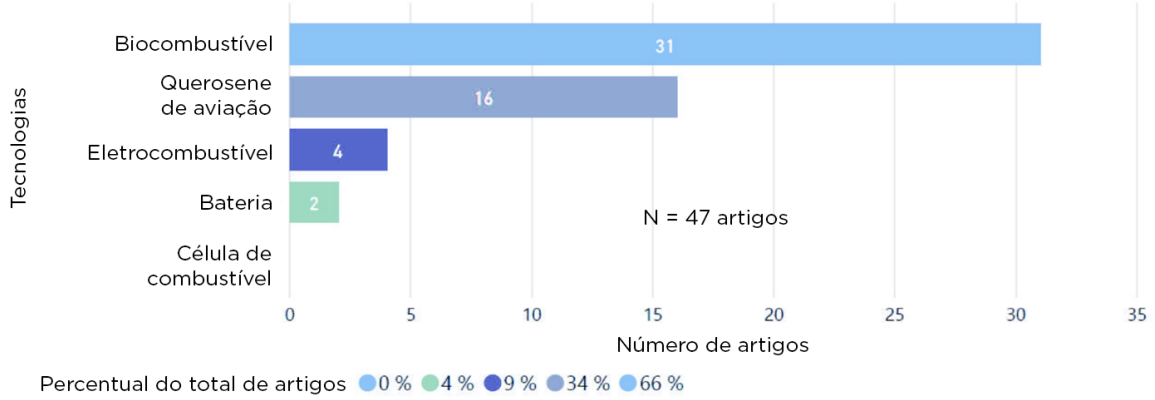
Figura 1 – Emissões comparativas de gases de efeito estufa ao longo de ciclo de vida de diferentes matérias-primas para SAF



de D'Ascenzo et al. (VENKATRAM et al., 2024)

A pesquisa sobre tecnologias de propulsão sustentáveis para a aviação se intensificaram na última década, voltadas para a redução da dependência do combustível fóssil através de processos de combustão aperfeiçoados, biocombustíveis e *e-fuels* [eletrocombustíveis] como o hidrogênio. De acordo com Hölzen et al. (ZHANG et al, 2023), as investigações recentes também se estenderam a conceitos de propulsão elétrica – elétrica a bateria e híbrida-elétrica – capazes de reduzir mais as emissões de gases do efeito estufa ao usarem a eletricidade de baterias ou células de combustível a bordo. A Figura 2 ilustra a distribuição de artigos que abordam estas tecnologias na literatura científica.

Figura 2 – Distribuição de artigos por tecnologias consideradas para a aviação sustentável



de Hölzen et al. (ZHANG et al., 2023)

3.1 Combustíveis sustentáveis de aviação (SAFs)

O Brasil emergiu como um dos líderes globais no potencial de produção de combustível sustentável de aviação (SAF), com as estimativas indicando que o país pode produzir até 9 bilhões de litros de SAF por ano, equivalentes a aproximadamente 125% de seu atual consumo anual de querosene de aviação fóssil (PALLAS; BENARD, 2022). Esta capacidade se dá, principalmente, graças à robusta base agroindustrial brasileira: o país é o segundo maior produtor mundial de etanol e o terceiro maior produtor de biodiesel, amparado por uma extensa cadeia de suprimentos para matérias-primas derivadas de biomassa (IYER; TAKAHASI, 2024). Conforme destacado em analises recentes, a produção brasileira de SAF pode depender de várias matérias-primas em larga escala, inclusive resíduos de cana-de-açúcar, biomassa de eucalipto, gases de combustão biogênicos, sebo bovino e óleo de cozinha usado, tudo disponibilizado em quantidades suficientes para dar suporte à implantação do SAF em escala comercial (IYER; TAKAHASHI, 2024).

O combustível sustentável de aviação (SAF) reduz as emissões líquidas de CO_2 usando biomassa ou resíduo, aproximando-se da neutralidade de carbono apesar das emissões provenientes da combustão. As emissões de NO_x permanecem semelhantes às dos combustíveis convencionais, mas o SAF reduz o impacto dos rastros de compensação ao produzir menos partículas de fuligem, resultando em cristais de gelo maiores e duração mais curta dos rastros de condensação. O combustível de hidrogênio elimina as emissões de CO_2 e reduz o NO_x pela combustão avançada, embora isso aumente a frequência do rastro de condensação devido ao vapor de água maior. Contudo, a ausência de fuligem leva a menos núcleos de gelo e cristais maiores, diminuindo significativamente o forçamento radiativo dos rastros de condensação e o impacto climático total (LEE et al., 2021).

3.2 Eletrificação

As aeronaves totalmente eletrificadas dependem de baterias a bordo para acionar os motores elétricos. A eletrificação representa uma atraente oportunidade para a aviação regional e de curta duração, especialmente para pequenas aeronaves. A propulsão elétrica oferece custos operacionais mais baixos, ruído reduzido e emissões diretas zero. (ROSEN; DINCER, 2021)

Entretanto, a tecnologia de baterias continua sendo o principal obstáculo. As atuais baterias de lítio-íon têm uma densidade de energia relativamente baixa (~200–300 Wh/kg) em comparação com o querosene de aviação (~12.000 Wh/kg), limitando o alcance e a capacidade de carga útil. Pesquisas e estudos estão em curso para as baterias da próxima geração, como as baterias de lítio-enxofre de estado sólido, que prometem maiores densidades de energia e segurança aprimorada (PRABHAKAR et. al., 2022). Empresas como a *Eviation*, que desenvolveu o projeto de aeronave “Alice”, a e Pipistrel são pioneiras em desenvolvimentos nesta área. Apesar de ainda haver muitos desafios na indústria da aviação global para este tipo de desenvolvimento, as empresas de renome mundial podem ver isso como o futuro das aeronaves (AMERICAN INSTITUTE OF AERONAUTICS AND ASTRONAUTICS, 2022).

Os estudos indicam que, nos próximos 5 anos, a pequena aeronave comercial começará a operar como eVTOLs e, nos 10 anos seguintes, haverá uma consolidação no mercado regional, e 20 anos depois, as aeronaves voarão com maiores amplitudes, devido a novas descobertas e avanços na tecnologia (LIU et al., 2023).

Hoje, a densidade de energia das baterias (~200–300Wh/kg) por esse motivo ainda precisa evoluir consideravelmente, com metas de 1000Wh/kg até meados de 2040, para tornar aeronaves maiores viáveis para voos regionais (LIU et al., 2023).

Figura 3 – O Eviation Alice realiza o primeiro voo



(AMERICAN INSTITUTE OF AERONAUTICS AND ASTRONAUTICS, 2022)

Embora a Figura 3 ilustre o primeiro voo bem-sucedido do protótipo Eviation Alice, suas métricas de desempenho ainda estão em fase de pré-certificação e não foram validadas por testes revisados por pares. Assim, o Alice é referido como demonstração de viabilidade e não como uma base para a comparação operacional quantitativa.

Figura 4 – EASA.A.573 – EASA.A.573 - Vírus SW 121



(EASA, 2020)

3.3. Análise comparativa: aeronave elétrica v. convencional

A propulsão elétrica apresenta benefícios ambientais mensuráveis, em especial para missões de curta duração, em que a aeronave movida a bateria elimina as emissões diretas de CO_2, NOx, SOx e partículas durante o voo. Protótipos experimentais como o Pipistrel Velis Electro confirmaram uma redução acústica significativa – voando com um ruído 20 a 30 dB mais baixo do que as aeronaves com motor a pistão – melhorando a exposição a ruídos urbana e regional (SILVA et al., 2003; EASA, 2020). Contudo, a despeito das vantagens operacionais e de manutenção associadas ao menor número de peças móveis, a viabilidade da propulsão elétrica para voos de média ou longa duração continua limitada pela densidade de energia das atuais baterias de lítio-íon (~200–300 Wh/kg), bem abaixo do combustível Jet-A (~12.000 Wh/kg) (ZHANG et al., 2023).

A propulsão híbrida elétrica emergiu como uma alternativa intermediária, reduzindo o consumo de combustível e as emissões sem depender exclusivamente de baterias. As simulações usando plataformas baseadas em turboélice demonstram economia potencial de combustível entre 15%–30% dependendo da participação da bateria, do perfil da missão e da distribuição de potência do motor (SCHOLZ; MICHELMANN; HORNUNG, 2021; PALLADINO et al., 2021). Os estudos também indicam que a arquitetura híbrida pode se beneficiar do suporte para potência máxima durante a decolagem e a subida, operando com maior eficiência em velocidade de cruzeiro quando combinada com a propulsão convencional (CILIBERTI et al., 2022). Contudo, a complexidade aumentada do sistema, o gerenciamento térmico e as penalidades de massa permanecem barreiras à implantação comercial.

Os Combustíveis Sustentáveis de Aviação (SAFs) ainda são a única solução pronta para uso atualmente utilizável em uma escala comercial. Dependendo da matéria-prima, da rota de produção e da alocação do ciclo de vida, o SAF pode reduzir as emissões de CO_2 em até ~80% em comparação com o querosene fóssil, sem a necessidade de importantes mudanças estruturais na frota de aeronaves (IYER; TAKAHASHI, 2024; D'ASCENZO et al., 2024). O Brasil apresenta um dos maiores potenciais de produção de SAF globalmente devido ao etanol de cana-de-açúcar, resíduos biogênicos e matérias-primas HEFA [*Ésteres e Ácidos Graxos Hidroprocessados*], permitindo a implantação a curto prazo enquanto outras tecnologias amadurecem (WATSON et al., 2024).

A propulsão a hidrogênio oferece potencial no longo prazo devido à sua alta energia específica no nível do combustível e a capacidade de eliminar CO_2 quando usada em células combustíveis. Contudo, as aeronaves devem incorporar tanques criogênicos ou sistemas de gás comprimido com demanda volumétrica muito elevada, e os requisitos de infraestrutura são substancialmente maiores do que o SAF ou os sistemas elétricos (PROESMANS; VOS, 2022; ROSEN; DINCER, 2021). Apesar de promissora, sua atividade comercial é significativamente menor, com previsão de entrada no mercado apenas após 2035 em cenários otimistas (SCHOLZ; MICHELMANN; HORNUNG, 2021; ZHANG et al., 2023).

Em resumo, o SAF oferece o caminho de descarbonização mais imediato devido à compatibilidade da frota e à prontidão industrial, enquanto a propulsão híbrido-elétrica cria uma transição de curto a médio prazo para aeronaves totalmente elétricas ou movidas a hidrogênio. Os sistemas elétricos a bateria proporcionam

desempenho ambiental inigualável para operações de curto alcance, mas continuam limitados tecnologicamente. O hidrogênio representa a solução de longo prazo mais revolucionária, embora a implantação prática dependa de rápida evolução na tecnologia de armazenamento, certificação de segurança e redes globais de distribuição de combustíveis.

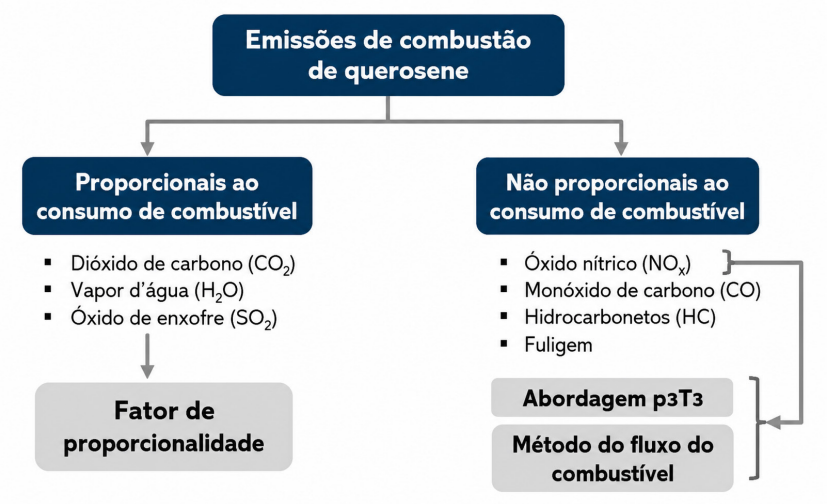
Tabela 2 – Comparação entre aeronave elétrica e convencional

Critérios	Aviões elétricos	Aviões convencionais	Fonte
Custo operacional	£5/hora (Velis Electro);	£100/hora (equivalente ao Cessna);	(EASA, 2020)
Custo de manutenção	Manutenção 30–50% inferior devido ao menor número de peças móveis	Maior frequência e complexidade da manutenção	(SCHOLZ; MICHELMANN; HORNUNG, 2021; SILVA et al., 2023)
Emissões	Emissões diretas zero (CO_2, NOx, partículas)	Altas emissões de GEE do querosene	(HÖLZEN et al., 2020; WATSON et al., 2024)
Níveis de ruído	20–30 dB mais baixo (Velis Electro)	Ruído alto, especialmente durante decolagem e pouso	(SILVA et al., 2023; EASA, 2020)
Alcance	<500–800 km de autonomia em voos de curta distância	Milhares de quilômetros; reabastecimento rápido	(SILVA et al., 2023; EASA, 2020)
Densidade de energia	200–300 Wh/kg (baterias)	~12,000 Wh/kg (querosene de aviação)	(ZHANG et al., 2023)
Ruído da decolagem	~60 dB (Velis Electro)	80–90 dB (turbofan)	(EASA, 2020)

O custo operacional em caixa (COC) desempenha um papel decisivo no projeto de aeronaves porque inclui as despesas operacionais diretas necessárias para os voos, como consumo de combustível e manutenção. Esses custos variam de acordo com a duração da missão, eficiência de cruzeiro e características de desempenho da aeronave, que sofrem grande influência da arquitetura de propulsão (PALLADINO et al., 2021). Para uma avaliação comparativa de longo prazo, os valores do COC são em geral normalizados para um ano de referência e ajustados pelos preços projetados da energia, especialmente quando as fontes alternativas de energia como o hidrogênio e o SAF são levadas em consideração (PALLADINO et al., 2021).

Despesas relacionadas à tripulação, depreciação e taxas aeroportuárias são geralmente excluídas nos estudos de otimização das etapas iniciais visando reduzir a incerteza do modelo e isolar os efeitos decorrentes da propulsão (SCHOLZ; MICHELMANN; HORNUNG, 2021; LEE et al., 2010). Minimizar o custo operacional em caixa, então, é um fator determinante para as futuras tecnologias de propulsão, sustentando estudos de viabilidade em arquiteturas baseadas em hidrogênio-elétricas e compatíveis com o SAF (PALLADINO et al., 2021).

Figura 5 – Métodos para o cálculo da emissão em voo



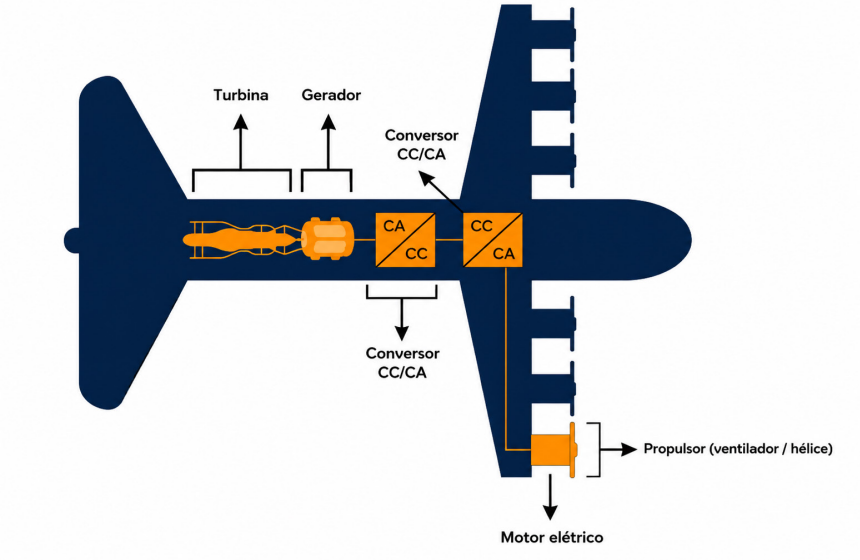
de (ROSEN; DINCER, 2021)

3.4. Sistemas de propulsão híbridos

Sistemas de propulsão híbridos combinam motores de combustão tradicionais com motores elétricos, oferecendo uma solução intermediária entre aeronaves convencionais e totalmente elétricas. Esses sistemas podem reduzir o consumo de combustível e as emissões, especialmente durante a decolagem e a subida, quando é necessária mais potência dessas ações, a partir daí, sistemas como a APU são utilizados apenas quando a aeronave está em solo e, portanto, são desligados após a partida dos motores. As configurações híbridas podem ser em paralelo ou em série, quando apenas o motor elétrico aciona a hélice, ou uma combinação de ambas (ICAO, 2019). Embora promissores, os sistemas híbridos ainda enfrentam alguns desafios de peso e complexidade, e seu benefício ambiental depende de a fonte de eletricidade ser capaz de ser combinada com uma fonte de energia sustentável, e o maior desafio a ser mensurado é a eficiência geral do sistema (EASA, 2020).

O modelo de aeronave híbrida elétrica é desenvolvido com base nas características da aeronave turboélice de referência, que incorpora dados geométricos, de massa e aerodinâmicos. O estudo se concentra no projeto de um sistema de propulsão híbrida paralelo que combina uma turbina a gás convencional com um sistema de propulsão elétrico com célula de combustível. Esta configuração foi selecionada devido à sua eficiência energética superior, peso reduzido e maior viabilidade em termos de integração e segurança em comparação com arquiteturas totalmente elétricas, que enfrentam desafios significativos relacionados ao volume do armazenamento de hidrogênio e riscos do sistema de alta tensão. Os motores elétricos empregados são máquinas de corrente alternada que requerem conversores de corrente contínua para corrente alternada, porque as células combustível fornecem energia em corrente contínua, conforme a fig. 4. Os módulos da célula combustível são projetados para oferecer potência líquida de saída de 100 kW por unidade, com características específicas de tensão e corrente (PALLADINO et al., 2021).

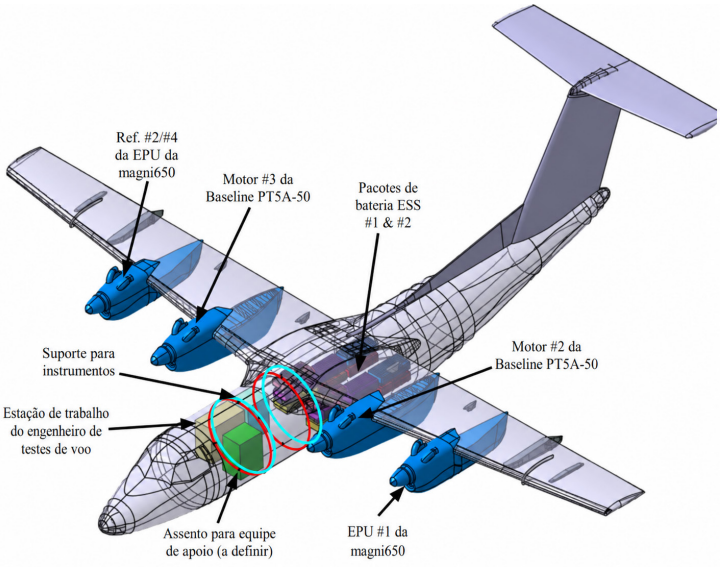
Figura 6 – Esquema de uma aeronave DEP turboelétrica híbrida



de (ANAC, 2022)

O estudo aborda o conceito de uma aeronave híbrida elétrica baseado em um protótipo do EPFD do magniX-NASA usando um De Havilland DHC-7-100 modificado. O protótipo adota uma arquitetura híbrida paralela com 2 motores a gás PT6 internos e 2 motores elétricos magni650 de 700 kW nas asas. Com baterias de 250 Wh/kg, estima-se um alcance de ~200 milhas náuticas (NM) e uma redução no consumo de combustível de ~45%; as versões futuras podem aumentar o alcance com baterias de maior densidade energética e motores PT6 mais potentes. A Figura 7 ilustra o conceito híbrido paralelo do DHC-7 do projeto EPFD.

Figura 7 – Conceito híbrido paralelo EPFD DHC-7



de (BEZOS-O'CONNOR, 2023)

4. RESULTADOS

Esta seção apresenta a matriz de decisão derivada da metodologia comparativa multicritério. A análise avalia quatro tecnologias de propulsão – Combustíveis Sustentáveis de Aviação (SAF), Sistemas Elétricos a Bateria, Propulsão a Hidrogênio e Sistemas Híbridos Elétricos – usando cinco critérios importantes: densidade de energia, custo operacional, prontidão da infraestrutura, potencial de redução das emissões e nível de maturidade tecnológica (TRL). As pontuações variam de 1 (muito baixa) até 5 (muito alta).

Tabela 3 – Metodologia comparativa multicritérios

Tecnologia	Densidade de energia	Custo operacional	Infraestrutura	Emissões	TRL
SAF	4	2	5	3	5
Elétrica a bateria	1	5	2	5	3
Hidrogênio	3	3	2	4	2
Híbrida elétrica	3	4	3	4	4

Interpretação dos resultados

- A metodologia de Combustíveis Sustentáveis da Aviação (SAF) atingiu o mais alto nível de maturidade geral, principalmente devido ao seu alto TRL e à sua total compatibilidade com a aeronave e infraestrutura existentes. A principal desvantagem está no custo operacional, pois o SAF continua mais caro do que o querosene fóssil.

- A metodologia de propulsão elétrica a bateria pontuou muito bem nas emissões e nos custos operacionais devido às mínimas peças móveis e às zero emissões diretas. Contudo, a sua densidade de energia muito baixa restringe bastante o alcance, limitando a aplicabilidade à aviação de curta distância.

- A metodologia de propulsão a hidrogênio apresenta grandes benefícios em termos de emissões e boa densidade de energia, mas pontuações baixas em TRL e prontidão da infraestrutura. A necessidade de grandes tanques criogênicos e logísticas de hidrogênio em todo o aeroporto complica a implantação no curto prazo.

- A metodologia de sistemas híbridos elétricos obteve resultados equilibrados, combinando emissões melhoradas e consumo de combustível reduzido com maiores TRLs em comparação com sistemas totalmente elétricos ou de hidrogênio, tornando-a adequada para as operações regionais.

Classificação geral

Com base na análise comparativa qualitativa, a classificação resultante é:

1. Combustíveis Sustentáveis de Aviação (SAF) – Prontidão mais elevada e total compatibilidade com a atual infraestrutura.

2. Sistemas híbridos elétricos – Resultados equilibrados e viabilidade de médio prazo realista.

3. Sistemas elétricos a bateria – Excelente desempenho ambiental, mas limitado pela baixa densidade de energia.

4. Propulsão a hidrogênio – Alto potencial no longo prazo, mas importantes barreiras em infraestrutura e TRL.

5. Discussão

Os resultados dos matriz de decisão reforçam que nenhuma tecnologia de propulsão oferece uma solução universal para descarbonizar a aviação. Cada alternativa ocupa um segmento diferente de viabilidade, maturidade e aplicação operacional. A análise demonstra que a aviação sustentável exigirá uma estratégia multifacetada, combinando combustível de substituição [*"drop-in"*], eletrificação e tecnologias de hidrogênio dependendo do perfil da missão e da categoria da aeronave.

Para voos de curta distância de menos de cerca de 500 km, a propulsão elétrica a bateria emerge como a opção mais viável. Aeronaves como a Eviation Alice e a Pipistrel Velis Electro provam que a eletrificação total é viável para pequenas capacidades de passageiros e operações regionais. Seu baixo custo operacional, baixo nível de ruído e zero emissões diretas a tornam candidata ideal para rotas de curta distância, operações urbanas e futuras redes eVTOL.

Para operações de média a longa distância, os Combustíveis Sustentáveis de Aviação (SAFs) continuam sendo a única solução pronta para uso imediato. Eles permitem reduções significativas nas emissões de CO2 ao longo do ciclo de vida, enquanto mantêm total compatibilidade com frotas de aeronaves, aeroportos e logísticas de combustível existentes. Apesar de seu custo mais alto e das limitações da matéria-prima, os SAFs são essenciais para cumprir as metas de emissão para 2030 e 2050 na aviação comercial, em especial para aeronaves de fuselagem larga.

A propulsão a hidrogênio representa um caminho promissor no longo prazo devido à sua elevada densidade energética e ao seu potencial para uma descarbonização profunda. Contudo, sua implantação é limitada pela necessidade de tanques de armazenamento criogênico, geometrias redesenhadas da fuselagem da aeronave e ampla transformação da infraestrutura do aeroporto. Esses desafios tornam o hidrogênio improvável para ser operacional em grande escala antes de 2035–2040, embora devam surgir protótipos antes disso. A propulsão híbrida elétrica age como uma tecnologia de transição, proporcionando economias de combustível mensuráveis enquanto permite eletrificação gradual e futura integração com sistemas baseados em hidrogênio ou SAF.

6. Conclusão

Este estudo proporciona uma análise abrangente da viabilidade técnica e econômica das fontes de energia sustentável e das tecnologias de armazenamento na aviação, concentradas em Combustíveis Sustentáveis de Aviação (SAFs), propulsão elétrica, hidrogênio e sistemas híbridos elétricos.

Através da análise comparativa e qualitativa, os resultados demonstram que nenhuma solução atualmente satisfaz todos os critérios operacionais, ambientais e financeiros para a aviação em grande escala. Em vez disso, cada tecnologia apresenta vantagens e limitações distintas que definem seu horizonte de aplicação mais adequado.

Os Combustíveis Sustentáveis de Aviação (SAFs) continuam sendo o caminho mais viável atualmente para descarbonizar a aviação comercial. Sua compatibilidade pronta para o uso com motores e infraestrutura existentes permite reduções da emissão no curto prazo de até 80%

por todo o ciclo de vida (WATSON et al. 2024). Entretanto, os altos custos de produção, disponibilidade limitada de matéria-prima e desafios de escalabilidade continuam a limitar a adoção generalizada (SILVA et al., 2023).

A propulsão elétrica apresenta uma vantagem ambiental sem paralelo, eliminando as emissões diretas e reduzindo o ruído em cerca de 20–30 dB, em comparação com as aeronaves com motor a pistão (PALLAS; BENARD, 2022). No entanto, a baixa densidade de energia das atuais baterias de íon-lítio (200–300 Wh/kg) continuam sendo um obstáculo crítico às operações de longa distância (LEE et al., 2010). A pesquisa em curso em baterias de lítio-enxofre de estado sólido pode aumentar a densidade da energia além de 1000 Wh/kg até 2040, potencialmente permitindo uso nas aeronaves elétricas regionais (LIU et al., 2023).

A propulsão a hidrogênio, tanto através da combustão quanto dos sistemas de células combustíveis, oferece uma elevada energia específica alternativa e rápido potencial de reabastecimento (PALLADINO et al., 2021; PROESMANS; VOS, 2022). Estudos como Palladino et al. (PALLADINO et al., 2021) e Proesmans & Vos (PROESMANS; VOS, 2022) indicam que o hidrogênio pode reduzir o impacto climático total em até 75% quando proveniente de eletrólise renovável. Entretanto, desafios em armazenamento criogênico, infraestrutura de distribuição e regulamentação da segurança ainda impedem a implantação imediata.

A propulsão híbrida elétrica representa uma tecnologia de transição, unindo o querosene de aviação convencional e a eletrificação total. Arquiteturas híbridas paralelas e em série demonstraram economias de combustível de 15–30% nos estudos de simulação (D'ASCENZO et al., 2024; PALLADINO et al., 2021). Sua integração com o SAF ou com sistemas auxiliares baseados a hidrogênio pode acelerar a descarbonização no setor da aviação regional durante as próximas duas décadas.

De uma perspectiva econômica, a aeronave totalmente elétrica já demonstra reduções no custo operacional superiores a 60% devido ao menor número de partes móveis e demandas de manutenção inferiores (SILVA et al., 2023). Contudo, alto investimento inicial, amplitude limitada e obstáculos à certificação atrasam sua competitividade em relação aos sistemas baseados no querosene.

Por fim, o caminho em direção à aviação sustentável dependerá de uma estratégia híbrida, combinando implantação de SAF no curto prazo, sistemas híbridos a hidrogênio no médio prazo, e maturidade da propulsão elétrica no longo prazo.

Conforme ressaltado em Rosen e Dincer (LIU et al., 2023), alcançar um setor de aviação com emissões líquidas zero até 2050 exigirá uma convergência tecnológica, harmonização de políticas e colaboração global entre fabricantes, reguladores e fornecedores de energia.

Concluindo, a transição para o voo sustentável é tecnicamente alcançável, mas complexa em termos econômicos e de infraestrutura. A indústria da aviação encontra-se em um momento decisivo, em que investimento consistente em P&D, infraestrutura de energia e estruturas reguladoras internacionais determinarão o ritmo da transformação. Avanços contínuos na química da bateria, na produção de hidrogênio verde e na escalabilidade do SAF representam os principais facilitadores da próxima geração de sistemas de aviação limpa.

BIBLIOGRAFIA

American Institute of Aeronautics and Astronautics. (28 de setembro de 2022). Eviation Alice Performs First Flight. AIAA News. https://aiaa.org/2022/09/28/eviation-alice-performs-first-flight/

ANAC. Sustainable Aviation Fuel Roadmap – Brazil, 2022.
Disponível em: https://www.fas.usda.gov/data/brazil-biofuels-annual-11

ATAG. Aviation Benefits Report. Genebra, 2019. Disponível em: https://aviationbenefits.org

BEZOS-O'CONNOR, J. NASA's EPFD Project's Progress Toward Reducing Barriers in Electric Aircraft Propulsion. UTIAS Workshop on Aviation & Climate, 2023.
Disponível em: https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20230008443/

CILIBERTI, D. et al. The Enabling Technologies for a Quasi-Zero Emissions Commuter Aircraft. Aerospace, 9, 2022. Disponível em: https://doi.org/10.3390/aerospace9060319

D'ASCENZO, F. et al. Comparative LCA of SAF Production. Sustainability, 16(16), 6875, 2024. Disponível em: https://doi.org/10.3390/su16166875

EASA. Type Certificate — Velis Electro SW-121. 2020.
Disponível em: https://www.easa.europa.eu/

HÖLZEN, M. et al. Technologies for a More Sustainable Aircraft Propulsion System. Sustainability, 12, 2020. Disponível em: https://doi.org/10.3390/su12145663

ICAO. 2022 Environmental Report: Innovation for a Green Transition. Montreal, 2022.
Disponível em: https://www.icao.int/environmental-protection/

ICAO. Long-Term Traffic Forecast 2018–2050. Montreal, 2019.
Disponível em: https://www.icao.int

IYER, A.; TAKAHASHI, T. T. The Impact of Drop-In vs Dedicated SAF on Aircraft Performance. AIAA Forum, 2024. Disponível em: https://doi.org/10.2514/6.2024-3986

KURNIAWAN, J.; KHARDI, S. Estimating Aircraft Emissions – Methodologies. EIA Review, 31, 240–252, 2011. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.eiar.2010.09.001

LEE, D. S. et al. Aviation and global climate change in the 21st century. Atmospheric Environment, 43, 3520–3537, 2009. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2009.04.024

LEE, D. S. et al. Global Aviation Forcing in 2018. Atmospheric Environment, 244, 2021.
Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2020.117834

LEE, D. S. et al. The contribution of global aviation to anthropogenic climate forcing. Atmospheric Environment, 2010.

LIU, B. et al. Progress in Lithium–Sulfur and Solid-State Batteries for Aviation. Energy

Storage Materials, 56, 2023. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.ensm.2023.08.004

PALLADINO, V. et al. Preliminary Studies of a Regional Aircraft with Hydrogen-Based Hybrid Propulsion. AIAA Forum, 2021. Disponível em: https://doi.org/10.2514/6.2021-2411

PALLAS, M.; BENARD, E. Hydrogen Fuel Cell Propulsion for Regional Aircraft. Aerospace, 9(1), 2022. Disponível em: https://doi.org/10.3390/aerospace9010017

PHAM, D. et al. Advanced Turboprop Transport Aircraft Modeling for the Electrified Powertrain Flight Demonstration Project. AIAA Aviation 2023 Forum, 2023. Disponível em: https://doi.org/10.2514/6.2023-3870

PRABHAKAR, N. et al. Energy Impacts of Electric Aircraft: Overview. AIAA Forum, 2022. Disponível em: https://doi.org/10.2514/6.2022-4119

PROESMANS, P. J.; VOS, R. Comparison of Future Aviation Fuels to Minimize Climate Impact. AIAA Forum, 2022. Disponível em: https://doi.org/10,2514/6,2022-3288

ROSEN, M. A.; DINCER, I. Analysis of Sustainable Energy Systems for Aviation Applications. Elsevier, 2021. Disponível em: https://doi.org/10.1016/B978-0-12-821226-9.00001-6

SCHOLZ, A. E.; MICHELMANN, J.; HORNUNG, M. Design, Operational and Environmental Assessment of a Hybrid-Electric Aircraft. AIAA SciTech, 2021. Disponível em: https://doi.org/10.2514/6.2021-0259

SILVA, R. F. et al. Sustainable Aviation Electrification: A Review. Sustainability, 15, 2023. Disponível em: https://doi.org/10.3390/su15010375

UNICA. Sugarcane Industrial Statistical Yearbook, 2023. Disponível em: https://apps.fas.usda.gov/newgainapi/

USDA. Biofuel Annual Report – Brazil, 2023. Disponível em: https://www.fas.usda.gov/data/brazil-biofuels-annual-11

VENKATRAM, N. M. et al. Modeling and Visualization of Zero-Impact Strategies for Aviation. AIAA SciTech, 2024. Disponível em: https://doi.org/10.2514/6.2024-1476

WATSON, M. et al. SAF Technologies, Policies & Costs: Review. J. Cleaner Production, 449, 2024. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.141472

WINDHORST, R. D. et al. ANALYSIS of Aeronave Híbrida Elétrica Operações no Nacional Airspace Sistema. AIAA Aviation 2024 Forum, 2024. Disponível em: https://doi.org/10.2514/6.2024-3958

ZHANG, Y. et al. Key Technologies and Upgrade Strategies for eVol Aircraft Energy Storage Systems. Journal of Energy Storage, 62, 2023. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.est.2023.106999

ARTICLE 3

SUSTAINABLE ENERGY SOURCES AND STORAGE TECHNOLOGIES IN AVIATION: A FEASIBILITY ANALYSIS

Fabriciu Benini e Matheus Rosa

RESUMO

Nos últimos anos, a indústria da aviação tem intensificado esforços para adotar soluções de propulsão sustentável, impulsionada por pressões ambientais e metas de descarbonização de longo prazo. Este artigo avalia a viabilidade técnica e econômica de fontes de energia e tecnologias de armazenamento alternativas para propulsão de aeronaves, focando em Combustíveis Sustentáveis de Aviação (SAFs), sistemas elétricos a bateria, propulsão a hidrogênio e arquiteturas híbridas-elétricas. Uma análise comparativa e qualitativa foi desenvolvida com base no desempenho energético, impacto ambiental, requisitos de infraestrutura, limitações operacionais e custos de ciclo de vida. Avanços recentes na química de baterias, rotas sustentáveis de produção de combustíveis e sistemas baseados em hidrogênio são examinados junto a estudos de caso de demonstradores de aeronaves emergentes. Os resultados indicam que nenhuma tecnologia única atende atualmente a todos os requisitos para aviação comercial de grande escala, reforçando a necessidade de uma estratégia de descarbonização em múltiplas vias combinando SAFs, conceitos híbridos-elétricos e futuras aeronaves elétricas e a hidrogênio.

Palavras-chave: combustíveis sustentáveis de aviação, propulsão elétrica, aeronaves a hidrogênio.

ABSTRACT

In recent years, the aviation industry has intensified efforts to adopt sustainable propulsion solutions driven by environmental pressures and long-term decarbonization goals. This article evaluates the technical and economic feasibility of alternative energy sources and storage technologies for aircraft propulsion, focusing on Sustainable Aviation Fuels (SAFs), battery-electric systems, hydrogen propulsion, and hybrid-electric architectures. A comparative and qualitative analysis was developed based on energy performance, environmental impact, infrastructure requirements, operational limitations, and life-cycle costs. Recent advances in battery chemistry, sustainable fuel production pathways, and hydrogen-based systems are examined alongside case studies of emerging aircraft demonstrators. Results indicate that no single technology currently meets all requirements for large-scale commercial aviation, reinforcing the need for a multi-path decarbonization strategy combining SAFs, hybrid-electric concepts, and future electric and hydrogen-powered aircraft.

Keywords: sustainable aviation fuels, electric propulsion, hydrogen aircraft

1. INTRODUCTION

While aviation enables global travel and contributes to the economy, it also contributes to greenhouse gas emissions. The aviation sector is responsible for 2 -3% of total global carbon dioxide emissions (LEE et al., 2009). The evolution of high-carbon fuels is under increasing scrutiny. Aviation services are seeking new approaches to green aircraft propulsion. While petroleum-based jet fuel is compact for long-haul travel and improves efficiency, it is completely out of sync with the long-term green goals set by the CORSIA and Fit for 55 agreements (WINDHORST et al., 2024) (The proposals are part of the Fit for 55 legislative packages, which aims to reduce the EU's greenhouse gas emissions by at least 55% by 2030). CORSIA is the Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation, a global plan by the International Civil Aviation Organization (ICAO) to reduce the growth of international aviation's carbon dioxide (CO_2) emissions. Investment in emerging technologies has highlighted the potential for substantial environmental growth in aviation and airlines through electric and hydrogen-powered propellants, as well as sustainable aviation fuels (SAFs) (BEZOS-O'CONNOR, 2023).

Each alternative offers potential benefits, along with constraints such as energy density, scale, weight, infrastructure and overall ecological impact. Lithium-ion aviation batteries provide zero emissions at the point of use. Lithium-ion batteries (PHAM et al., 2023) for aviation powered by electricity, however, face challenges with energy-intensive storage and weight. Hydrogen fuel cells (LEE et al., 2010), however, have their drawbacks. Hydrogen fuel cells promise to be the solution for high energy demand and rapid refueling, but complex storage and widespread fuel distribution are the main limiting factors. This article has the key role of showing alternatives that are already being used by the aircraft industry and ongoing studies that could revolutionize this market. SAF remains a key solution deployed (ICAO, 2022), supported by ongoing studies and industrial adoption.

2. METHODOLOGY

This study is structured as an integrative literature review combined with a qualitative multi-criteria decision analysis (MCDA). The research was conducted in two main phases to evaluate the technical and economic feasibility of alternative energy sources for aviation.

In the first phase, a comprehensive literature search was performed to map the state-of-the-art in sustainable aviation propulsion. The search utilized academic databases, primarily ScienceDirect and Google Scholar, alongside official technical reports from regulatory agencies and industry associations, such as the International Civil Aviation Organization (ICAO), the European Union Aviation Safety Agency (EASA), and the Air Transport Action Group (ATAG). The search strategy employed combinations of keywords including "sustainable aviation fuels", "electric aircraft", "hydrogen propulsion", "aviation energy storage", and "life-cycle assessment". To ensure the relevance and timeliness of the data regarding technological readiness, the selection prioritized peer-reviewed articles and institutional reports published predominantly between 2015 and 2024.

In the second phase, a Decision Matrix was developed to systematically compare the viability of the identified energy sources: Sustainable Aviation Fuels (SAFs), battery-electric systems, and hydrogen propulsion. Rather than employing a purely statistical aggregation, which falls outside the scope of this qualitative feasibility analysis, the matrix criteria were derived directly from the primary constraints for commercial aviation decarbonization highlighted in the reviewed literature.

The selected evaluation criteria encompass Energy Performance (Density), Environmental Impact, Infrastructure Requirements, Operational Limitations, and Life-cycle Costs. The weights assigned to each criterion in the results section were determined qualitatively based on the consensus of critical barriers found in the literature. For instance, physical and safety constraints—such as gravimetric energy density and operational limitations—were assigned higher critical weights, as they represent hard engineering barriers for aircraft design, whereas infrastructure and economic factors, though significant, were treated as secondary scalable variables. This methodological framework provides a structured and transparent basis for the qualitative comparative assessment presented in the discussion.

2.1 Comparative Framework

A comparison matrix was developed to evaluate propulsion alternatives based on both quantitative (numerical) and qualitative (descriptive) criteria.

Table 1 - Comparative Framework

Criterion	Metric / Unit	Reference
Energy density	Wh/kg	(PROESMANS; VOS, 2022)
Operating cost	US$/hour	(WINDHORST et al., 2024)
Emission reduction	% vs Jet-A	(PALLAS; BENARD, 2022)
Maintenance cost	% reduction	(HÖLZEN et al., 2020)
Noise level	dBA	(LEE et al., 2010)
Fuel availability	Global production (t/year)	(CILIBERTI et al., 2022)

This approach aligns with the sustainable decision-making model discussing in Rosen & Dincer (2021), supporting the weighting structure used in this work.

2.2 Analytical Approach

- The analytical framework consists of three complementary stages:

- Literature synthesis: identifying areas of consensus and divergence among prior studies.

- Technology projection: estimating progress in energy density, cost, and efficiency through 2045 based on TRL evolution.

- Scenario assessment: establishing three adoption horizons for sustainable aviation:

- Short-term (2025–2030): expansion of SAF production and operational introduction of all-electric eVTOLs.

- Medium-term (2030–2040): deployment of hybrid-electric and hydrogen fuel cell systems for regional aviation.

- Long-term (2040–2050): integration of fully electric and hydrogen-powered aircraft into commercial fleets.

- These scenarios align with frameworks described in Electric Propulsion for Regional Aircraft – Critical Components and Challenges (PRABHAKAR et al., 2022) and Sustainable Aviation Electrification: A Comprehensive Review (KURNIAWAN; KHARDI, 2011).

3. LITERATURE REVIEW

This section presents a critical review of energy consumption and the sources that are used. It begins by contextualizing the environmental impact of the aviation sector, followed by an analysis of the main sustainable energy sources applicable to aviation, current and emerging energy storage technologies, as well as real-world initiatives and case studies. Finally, it discusses the main technical, economic and regulatory challenges that must be addressed to enable a viable transition to sustainable aviation in the coming years.

The aviation industry plays a vital role in the global economy, supporting 4.1% of world GDP (ATAG, 2019). In the United States, aviation includes a wide network of airports, airlines, and manufacturers and is a major contributor to both the economy and the national transportation system (PALLADINO et al., 2021). Given its size, it is not surprising that aviation is responsible for 10% of all transport-sector greenhouse gas (GHG) emissions (ICAO, 2022). Most aviation emissions originate in turbofan and propulsion engines: atmospheric air (a mix of nitrogen and oxygen) enters the propulsion system, mixes with jet fuel—a complex hydrocarbon blend—in the combustor, and undergoes combustion, producing energy along with CO_2, water vapor, nitrogen and sulfur oxides, and unburned hydrocarbons (SCHOLZ; MICHELMANN; HORNUNG, 2021).

Aviation emissions are expected to rise as air travel demand grows. After a

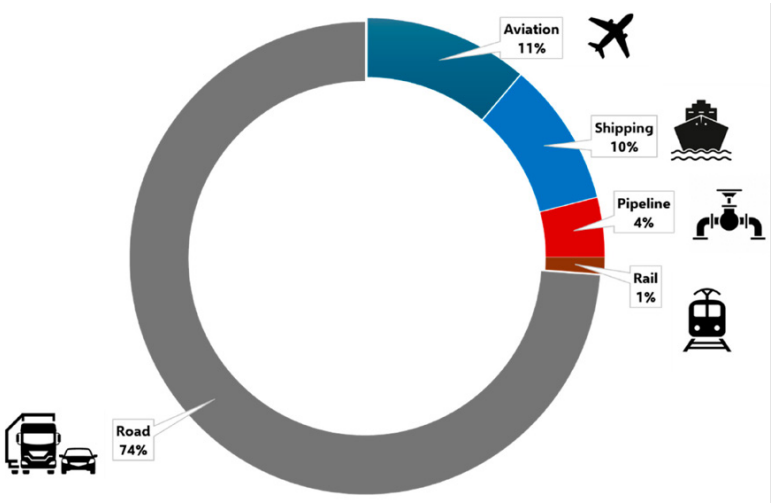
severe downturn during the 2020–2022 pandemic, passenger traffic has nearly returned to pre-COVID19 levels by 2026 (PROESMANS; VOS, 2022). Passenger demand, measured by Revenue Passenger Miles (RPM), is projected to increase by about 3% per year through at least 2041 (PROESMANS; VOS, 2022). By 2050, roughly 10 billion passengers are expected to fly. If the current fleet operates without technological or operational improvements, aviation could emit approximately 2 Gt of CO_2 in 2050 (ICAO, 2022).

In 2022, the aviation sector produced nearly 1 billion tons of CO2 (LEE et al., 2009), or about 2% of the 42 billion tons of CO2 produced annually by human activity (WINDHORST et al., 2024). Aviation currently accounts for about 2.0–2.5% of global annual carbon emissions and is expected to capture a larger share if other sectors decarbonize more rapidly. ICAO projects an average annual growth in demand for revenue passenger kilometers (RPKs) of 3.6% from 2018 to 2050, even when the impacts of the COVID19 pandemic are considered.

According to Lee et al. (2021) and ICAO, CO_2 emissions from the aviation sector represent about 2% of the total global anthropogenic emissions. When non-CO_2 effects of aviation (such as contrails, ozone, aerosols, etc.) are included, the climate impact of the sector rises to approximately 3-4% of the global radiative forcing (ICAO, 2022; LEE et al., 2021).

Recent comparative life-cycle assessments have analyzed the environmental performance of different biomass feedstocks for SAF production (VENKATRAM et al., 2024) (Figure 1).

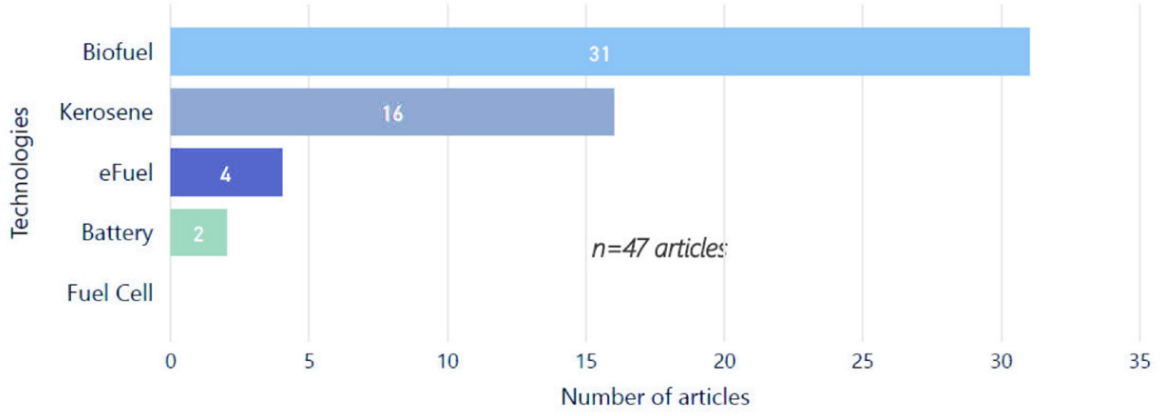
Figure 1 - Comparative life-cycle greenhouse-gas emissions of different SAF feedstocks



from D'Ascenzo et al. (VENKATRAM et al., 2024)

Research on sustainable propulsion technologies for aviation has intensified over the past decade, focusing on reducing fossil fuel dependency through improved combustion processes, biofuels, and e-fuels such as hydrogen. According to Hölzen et al. (ZHANG et al., 2023), recent investigations have also expanded toward electrified propulsion concepts—battery-electric and hybrid-electric—capable of further reducing greenhouse-gas emissions by utilizing electricity either from onboard batteries or fuel cells. Figure 2 illustrates the distribution of articles addressing these technologies in the scientific literature.

Figure 2 - Distribution of articles by considered technologies for sustainable aviation



from Hölzen et al. (ZHANG et al., 2023)

3.1 Sustainable Aviation Fuels (SAFS)

Brazil has emerged as one of the global leaders in sustainable aviation fuel (SAF) production potential, with estimates indicating that the country could produce up to 9 billion liters of SAF per year, equivalent to approximately 125% of its current annual fossil jet fuel consumption (PALLAS; BENARD, 2022). This capacity is largely due to Brazil's robust agro-industrial base: the country is the world's second-largest producer of ethanol and the third-largest producer of biodiesel, supported by an extensive supply chain for biomass-derived feedstocks (IYER; TAKAHASHI, 2024). As highlighted in recent reviews, Brazil's SAF production can rely on several large-scale feedstocks, including sugarcane residues, eucalyptus biomass, biogenic combustion gases, beef tallow, and used cooking oil, all of which are available in sufficient quantities to support commercial-scale SAF deployment (IYER; TAKAHASHI, 2024).

Sustainable Aviation Fuels (SAF) reduce net CO_2 emissions by using biomass or waste, approaching carbon neutrality despite combustion emissions. NO_x emissions remain similar to conventional fuels, but SAF lowers contrail impact by producing fewer soot particles, resulting in larger ice crystals and shorter contrail lifetimes. Hydrogen fuel eliminates CO_2 emissions and reduces NO_x through advanced combustion, though it increases contrail frequency due to higher water vapor. However, the absence of soot leads to fewer ice nuclei and larger crystals, significantly decreasing contrail radiative forcing and overall climate impact (LEE et al., 2021).

3.2 Electrification

Fully electric aircraft rely on onboard batteries to power electric motors. Electrification represents an attractive opportunity for regional and short-haul aviation, especially for small aircraft. Electric propulsion offers lower operating costs, reduced noise and zero direct emissions. (ROSEN; DINCER, 2021)

However, battery technology remains the main obstacle. Current lithium-ion batteries have a relatively low energy density (~200–300 Wh/kg) compared to jet fuel (~12,000 Wh/kg), limiting range and payload capacity. Research and studies are underway for next-generation batteries, such as lithium-sulfur and solid-state batteries, which promise higher energy densities and improved safety (PRABHAKAR et al., 2022). Companies such as Eviation, which developed the "Alice" aircraft project, and Pipistrel are pioneering developments in this area. Although there are still many challenges in the global aviation industry for this type of development, world-renowned companies see this as the future of aircraft (AMERICAN INSTITUTE OF AERONAUTICS AND ASTRONAUTICS, 2022).

Studies indicate that in the next 5 years, small commercial aircraft will begin operating as eVTOLs, and in the next 10 years, there will be consolidation in the regional market, and in 20 years, aircraft will fly with greater ranges, through new discoveries and advances in technology (LIU et al., 2023).

Currently, the energy density of batteries (~200–300Wh/kg) therefore needs to evolve considerably, with targets of 1000Wh/kg by mid-2040, to make larger aircraft for regional flights viable (LIU et al., 2023).

Figure 3 - Eviation Alice Performs First Flight



(AMERICAN INSTITUTE OF AERONAUTICS AND ASTRONAUTICS, 2022)

Although Figure 3 illustrates the first successful flight of Eviation Alice demonstrator, its performance metrics remain pre-certification and are not yet validated through peer-reviewed testing. Therefore, Alice is referenced as demonstration of feasibility rather than as a basis for quantitative operational comparison.

Figure 4 - EASA.A.573 - Virus SW 121



(EASA, 2020)

3.3. Comparative analysis: electric vs. conventional aircraft

Electric propulsion presents measurable environmental benefits, especially for short-haul missions, where battery-powered aircraft eliminate direct emissions of CO_2, NOx, SOx and particulates during flight. Experimental demonstrators such as the Pipistrel Velis Electro have confirmed significant acoustic reduction — flying 20–30 dB quieter than piston-engine aircraft — improving urban and regional noise exposure (SILVA et al., 2023; EASA, 2020). However, despite operational and maintenance advantages associated with fewer moving parts, the feasibility of electric propulsion for medium- or long-range flights remains limited by the energy density of current lithium-ion batteries (~200–300 Wh/kg), far below Jet-A fuel (~12,000 Wh/kg) (ZHANG et al., 2023).

Hybrid-electric propulsion has emerged as an intermediate alternative, reducing fuel burn and emissions without relying exclusively on batteries. Simulations using turboprop-based platforms demonstrate potential fuel savings between 15%–30% depending on battery share, mission profile, and engine power split (SCHOLZ; MICHELMANN; HORNUNG, 2021; PALLADINO et al., 2021). Studies also indicate that hybrid architecture can benefit from peak-power support during takeoff/climb and operate more efficiently in cruise when combined with conventional propulsion (CILIBERTI et al., 2022). However, increased system complexity, thermal management, and mass penalties remain barriers to commercial implementation.

Sustainable Aviation Fuels (SAF) remain the only drop-in solution currently deployable on a commercial scale. Depending on feedstock, production route, and life-cycle allocation, SAF can reduce CO_2 emissions by up to ~80% compared to fossil kerosene, without requiring major structural changes in the aircraft fleet (IYER; TAKAHASHI, 2024; D'ASCENZO et al., 2024). Brazil presents one of the highest SAF production potentials globally due to sugarcane-based ethanol, biogenic residues, and HEFA feedstocks, enabling near-term implementation while other technologies mature (WATSON et al., 2024).

Hydrogen propulsion offers long-term potential due to its high specific energy at the fuel level and capacity to eliminate CO_2 when used in fuel cells. However, aircraft must incorporate cryogenic tanks or compressed-gas systems with very high volumetric demand, and infrastructure requirements are substantially greater than SAF or electric systems (PROESMANS; VOS, 2022; ROSEN; DINCER, 2021). Although promising, its commercial readiness is significantly lower, with entry forecasted only beyond 2035 under optimistic scenarios (SCHOLZ; MICHELMANN; HORNUNG, 2021; ZHANG et al., 2023).

In summary, SAF provides the most immediate decarbonization pathway due to fleet compatibility and industrial readiness, while hybrid-electric propulsion creates a short-to-medium-term transition toward fully electric or hydrogen-powered aircraft. Battery electric systems deliver unmatched environmental performance for short-range operations but remain technologically constrained. Hydrogen represents the most disruptive long-term solution, although practical deployment depends on rapid evolution in storage technology, safety certification, and global fuel distribution networks.

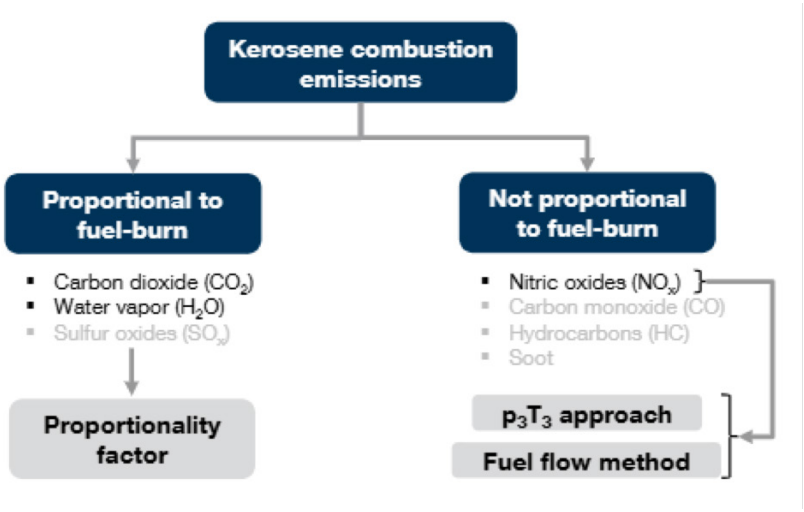
Table 2 - Comparison between electric and conventional aircraft

Criterion	Electric Aircraft	Conventional Aircraft	Source
Operational cost	£5/hour (Velis Electro);	£100/hour (Cessna equivalent);	(EASA, 2020)
Maintenance cost	30–50% lower maintenance due to fewer moving parts	Higher maintenance frequency and complexity	(SCHOLZ; MICHELMANN; HORNUNG, 2021; SILVA et al., 2023)
Emissions	Zero direct emissions (CO_2, NOx, particles)	High GHG emissions from kerosene	(HÖLZEN et al., 2020; WATSON et al., 2024)
Noise levels	20–30 dB lower (Velis Electro)	High noise, especially during takeoff and landing	(SILVA et al., 2023; EASA, 2020)
Range	<500–800 km short-haul capability	Thousands of kilometers; fast refueling	(SILVA et al., 2023; EASA, 2020)
Energy density	200–300 Wh/kg (batteries)	~12,000 Wh/kg (jet fuel)	(ZHANG et al., 2023)
Takeoff noise	~60 dB (Velis Electro)	80–90 dB (turbofan)	(EASA, 2020)

Cash operating cost (COC) plays a decisive role in aircraft design because it includes the direct operational expenses required for flights such as fuel burns and maintenance. These costs vary with mission length, cruise efficiency, and aircraft performance characteristics, which are strongly influenced by propulsion architecture (PALLADINO et al., 2021). For long-term comparative evaluation, COC values are often normalized to a common year and adjusted by projected energy pricing, particularly when alternative energy carriers such as hydrogen and SAF are considered (PALLADINO et al., 2021).

Crew-related expenses, depreciation and airport fees are commonly excluded in early-stage optimization studies to reduce model uncertainty and isolate propulsion-driven effects (SCHOLZ; MICHELMANN; HORNUNG, 2021; LEE et al., 2021). Minimizing cash operating cost is therefore a key driver for future propulsion technologies and supports feasibility studies across hydrogen-electric and SAF-compatible architectures (PALLADINO et al., 2021).

Figure 5 - Methods for in-flight emission calculation



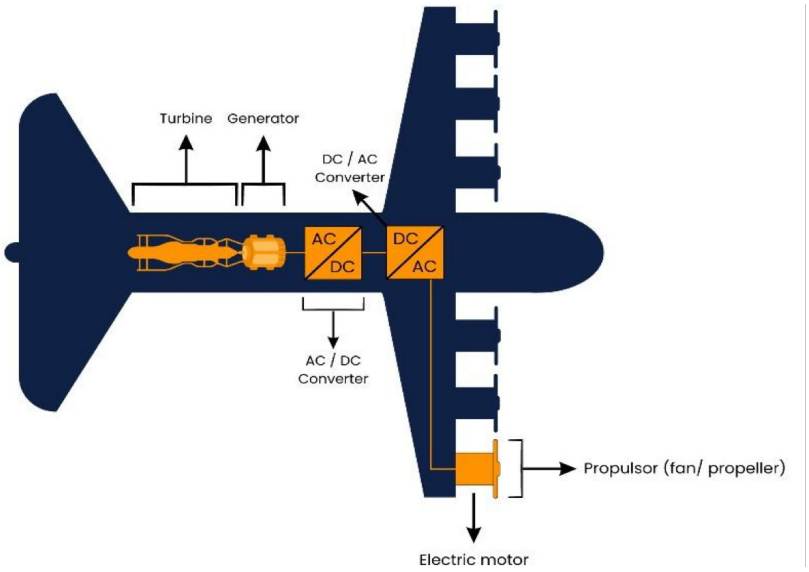
from (ROSEN; DINCER, 2021)

3.4. Hybrid propulsion systems

Hybrid propulsion systems combine traditional combustion engines with electric motors, offering a middle ground solution between conventional and all-electric aircraft. These systems can reduce fuel consumption and emissions, especially during takeoff and climb, where more power is required to perform these actions, after which systems such as the APU are used only when the aircraft is on the ground, and are thus switched off after the engines start. Hybrid configurations can be parallel or series where only the electric motor drives the propeller or a combination of both (ICAO, 2019). Although promising, hybrid systems still face some challenges of weight and complexity, and their environmental benefit depends on the source of electricity being able to be combined with a sustainable energy source and the biggest challenge to be measured is their overall system efficiency (EASA, 2020).

The hybrid electric aircraft model is developed based on the baseline turboprop aircraft characteristics, incorporating geometric, mass, and aerodynamic data. The study focuses on designing a parallel hybrid propulsion system that combines a conventional gas turbine with a fuel cell electric powertrain. This configuration was selected due to its superior energy efficiency, reduced weight, and greater feasibility in terms of integration and safety compared to full-electric architectures, which face significant challenges related to hydrogen storage volume and high voltage system risks. The electric motors employed are AC machines requiring DC-AC converters because fuel cells provide DC power showing in fig. 4. The fuel cell modules designed to deliver net power outputs of 100 kW per unit, with specific voltage and current characteristics (PALLADINO et al., 2021).

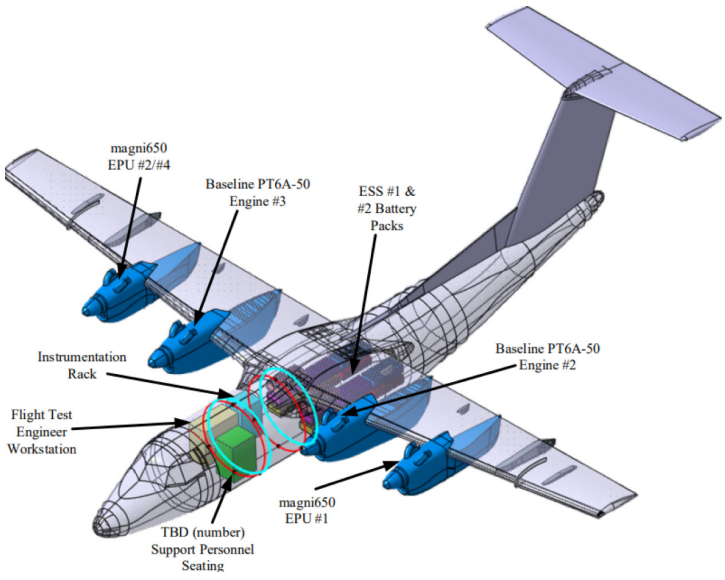
Figure 6 - Layout of a hybrid turboelectric DEP aircraft



from (ANAC, 2022)

The study addresses a hybrid-electric aircraft concept based on a magniX–NASA EPFD demonstrator, using a modified De Havilland DHC-7-100. The demonstrator adopts a parallel hybrid architecture with two internal PT6 gas engines and two 700 kW magni650 electric motors on the wings. With 250 Wh/kg batteries, an estimated range of ~200 NM and a fuel reduction of ~45% are projected; future versions may increase the range with higher energy density batteries and larger PT6 engines. Figure 7 illustrates the parallel hybrid concept of the DHC-7 from the EPFD project.

Figure 7 - EPFD DHC-7 Parallel Hybrid Concept



de (BEZOS-O'CONNOR, 2023)

4. RESULTS

This section presents the decision matrix derived from the multi-criteria comparative methodology. The analysis evaluates four propulsion technologies—Sustainable Aviation Fuels (SAF), Battery-Electric Systems, Hydrogen Propulsion, and Hybrid-Electric Systems—using five key criteria: Energy Density, Operational Cost, Infrastructure Readiness, Emissions Reduction Potential, and Technology Readiness Level (TRL). Scores range from 1 (Very Low) to 5 (Very High).

Table 3 – Multi Criteria Comparative Methodology

Technology	Energy Density	Operational Cost	Infrastructure	Emissions	TRL
SAF	4	2	5	3	5
Battery-Electric	1	5	2	5	3
Hydrogen	3	3	2	4	2
Hybrid-Electric	3	4	3	4	4

Interpretation of Results

• Sustainable Aviation Fuels (SAF) achieved the highest overall maturity, primarily due to their high TRL and full compatibility with existing aircraft and infrastructure. Their main disadvantage lies in operational cost, as SAF remains more expensive than fossil kerosene.

• Battery-electric propulsion scored extremely well in emissions and operating costs due to minimal moving parts and zero direct emissions. However, it's very low energy density severely restricts range, limiting applicability to short-haul aviation.

• Hydrogen propulsion presents strong emissions benefits and good specific energy but scores low in TRL and infrastructure readiness. The need for large cryogenic tanks and airport-wide hydrogen logistics complicates short-term implementation.

• Hybrid-electric systems obtained balanced results, combining improved emissions and reduced fuel burn with higher TRLs compared to full-electric or hydrogen systems, making them suitable for regional operations.

Overall Ranking

Based on the qualitative comparative assessment, the resulting ranking is:

1. Sustainable Aviation Fuels (SAF) – Highest readiness and full compatibility with today's infrastructure.

2. Hybrid-Electric Systems – Balanced results and realistic medium-term feasibility.

3. Battery-Electric Systems – Excellent environmental performance but limited by low energy density.

4. Hydrogen Propulsion – High long-term potential but major infrastructure and TRL barriers.

5. DISCUSSION

The results of the decision matrix reinforce that no single propulsion technology offers a universal solution to decarbonize aviation. Each alternative occupies a different segment of feasibility, maturity, and operational application. The analysis demonstrates that sustainable aviation will require a multi-path strategy, combining drop-in fuels, electrification, and hydrogen technologies depending on mission profile and aircraft category.

For short-range flights below approximately 500 km, battery-electric propulsion emerges as the most viable option. Aircraft such as the Eviation Alice and the Pipistrel Velis Electro prove that full electrification is achievable for small passenger capacities and regional operations. Their low operating cost, low noise signature, and zero direct emissions make them ideal candidates for short-haul routes, urban operations, and future eVTOL networks.

For medium- to long-haul operations, Sustainable Aviation Fuels (SAFs) remain the only immediately deployable solution. They enable substantial reductions in life-cycle CO_2 emissions while maintaining full compatibility with existing aircraft fleets, airports, and fuel logistics. Despite their higher cost and feedstock limitations, SAFs are essential for meeting 2030 and 2050 emission targets in commercial aviation, especially for widebody aircraft.

Hydrogen propulsion represents a promising long-term pathway due to its high specific energy and potential for deep decarbonization. However, its implementation is constrained by the need for cryogenic storage tanks, redesigned aircraft fuselage geometries, and extensive airport infrastructure transformation. These challenges make hydrogen unlikely to be operational at scale before 2035–2040, although demonstrators are expected earlier. Hybrid-electric propulsion acts as a bridge technology, delivering measurable fuel savings while enabling gradual electrification and future integration with hydrogen or SAF-based systems.

6. CONCLUSION

This study provided a comprehensive assessment of the technical and economic feasibility of sustainable energy sources and storage technologies in aviation, focusing on Sustainable Aviation Fuels (SAFs), electric propulsion, hydrogen, and hybrid-electric systems.

Through comparative and qualitative analysis, the results demonstrate that no single solution currently satisfies all operational, environmental, and financial criteria for large-scale aviation. Instead, each technology presents distinct advantages and constraints that define its most suitable application horizon.

Sustainable Aviation Fuels (SAFs) remain the most immediately viable pathway for decarbonizing commercial aviation. Their drop-in compatibility with existing engines and infrastructure allows for short-term emission reductions of up to 80% across the life cycle (WATSON et al., 2024). However, high production costs, limited feedstock availability, and scalability challenges continue to constrain widespread adoption (SILVA et al., 2023).

Electric propulsion presents an unparalleled environmental advantage, eliminating direct emissions and reducing noise by over 20–30 dB compared to piston-engine aircraft (PALLAS; BENARD, 2022). Nonetheless, the low energy density of current lithium-ion batteries

(200–300 Wh/kg) remains a critical barrier to long-range operations (LEE et al., 2021). Ongoing research in solid-state and lithium–sulfur batteries could raise energy densities beyond 1000 Wh/kg by 2040, potentially enabling regional electric aircraft (LIU et al., 2023).

Hydrogen propulsion, both through combustion and fuel cell systems, offers a high specific energy alternative and rapid refueling potential (PALLADINO et al., 2021; PROESMANS; VOS, 2022). Studies such as Palladino et al. (PALLADINO et al., 2021) and Proesmans & Vos (PROESMANS; VOS, 2022) indicate that hydrogen could reduce total climate impact by up to 75% when sourced from renewable electrolysis. However, challenges in cryogenic storage, distribution infrastructure, and safety regulation still hinder immediate implementation.

Hybrid-electric propulsion represents a transitional technology, bridging conventional jet fuel and full electrification. Parallel and series-hybrid architectures have shown fuel savings of 15–30% in simulation studies (D'ASCENZO et al., 2024; PALLADINO et al., 2021). Their integration with SAF or hydrogen-based auxiliary systems could accelerate decarbonization in the regional aviation sector over the next two decades.

From an economic perspective, all-electric aircraft already demonstrate operational cost reductions exceeding 60% due to fewer moving parts and lower maintenance demands (SILVA et al., 2023). However, high initial investment, limited range, and certification barriers delay their competitiveness relative to kerosene-based systems.

Ultimately, the path toward sustainable aviation will rely on a hybrid strategy, combining SAF deployment in the short term, hybrid-hydrogen systems in the medium term, and electric propulsion maturity in the long term.

As highlighted by Rosen and Dincer (LIU et al., 2023), achieving a net-zero aviation sector by 2050 will require technological convergence, policy harmonization, and global collaboration between manufacturers, regulators, and energy suppliers.

In conclusion, the transition to sustainable flight is technically achievable but economically and infrastructurally complex. The aviation industry stands at a pivotal moment where consistent investment in R&D, energy infrastructure, and international regulatory frameworks will determine the pace of transformation. Continuous advancements in battery chemistry, green hydrogen production, and SAF scalability represent the key enablers of the next generation of clean aviation systems.

BIBLIOGRAPHY

American Institute of Aeronautics and Astronautics. (2022, September 28). Eviation Alice Performs First Flight. AIAA News. https://aiaa.org/2022/09/28/eviation-alice-performs-first-flight/

ANAC. Sustainable Aviation Fuel Roadmap – Brazil, 2022. Available at: https://www.fas.usda.gov/data/brazil-biofuels-annual-11

ATAG. Aviation Benefits Report. Geneva, 2019. Available at: https://aviationbenefits.org

BEZOS-O'CONNOR, J. NASA's EPFD Project's Progress Toward Reducing Barriers in Electric Aircraft Propulsion. UTIAS Workshop on Aviation & Climate, 2023. Available at: https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20230008443/

CILIBERTI, D. et al. The Enabling Technologies for a Quasi-Zero Emissions Commuter Aircraft. Aerospace, 9, 2022. Available at: https://doi.org/10.3390/aerospace9060319

D'ASCENZO, F. et al. Comparative LCA of SAF Production. Sustainability, 16(16), 6875, 2024. Available at: https://doi.org/10.3390/su16166875

EASA. Type Certificate — Velis Electro SW-121. 2020. Available at: https://www.easa.europa.eu/

HÖLZEN, M. et al. Technologies for a More Sustainable Aircraft Propulsion System. Sustainability, 12, 2020. Available at: https://doi.org/10.3390/su12145663

ICAO. 2022 Environmental Report: Innovation for a Green Transition. Montreal, 2022. Available at: https://www.icao.int/environmental-protection/

ICAO. Long-Term Traffic Forecast 2018–2050. Montreal, 2019. Available at: https://www.icao.int

IYER, A.; TAKAHASHI, T. T. The Impact of Drop-In vs Dedicated SAF on Aircraft Performance. AIAA Forum, 2024. Available at: https://doi.org/10.2514/6.2024-3986

KURNIAWAN, J.; KHARDI, S. Estimating Aircraft Emissions – Methodologies. EIA Review, 31, 240–252, 2011. Available at: https://doi.org/10.1016/j.eiar.2010.09.001

LEE, D. S. et al. Aviation and global climate change in the 21st century. Atmospheric Environment, 43, 3520–3537, 2009. Available at: https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2009.04.024

LEE, D. S. et al. Global Aviation Forcing in 2018. Atmospheric Environment, 244, 2021.\ Available at: https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2020.117834

LEE, D. S. et al. The contribution of global aviation to anthropogenic climate forcing. Atmospheric Environment, 2010.

LIU, B. et al. Progress in Lithium–Sulfur and Solid-State Batteries for Aviation. Energy Storage Materials, 56, 2023. Available at: https://doi.org/10.1016/j.ensm.2023.08.004

PALLADINO, V. et al. Preliminary Studies of a Regional Aircraft with Hydrogen-Based Hybrid Propulsion. AIAA Forum, 2021. Available at: https://doi.org/10.2514/6.2021-2411

PALLAS, M.; BENARD, E. Hydrogen Fuel Cell Propulsion for Regional Aircraft. Aerospace, 9(1), 2022. Available at: https://doi.org/10.3390/aerospace9010017

PHAM, D. et al. Advanced Turboprop Transport Aircraft Modeling for the Electrified Powertrain Flight Demonstration Project. AIAA Aviation 2023 Forum, 2023. Available at: https://doi.org/10.2514/6.2023-3870

PRABHAKAR, N. et al. Energy Impacts of Electric Aircraft: Overview. AIAA Forum, 2022. Available at: https://doi.org/10.2514/6.2022-4119

PROESMANS, P. J.; VOS, R. Comparison of Future Aviation Fuels to Minimize Climate Impact. AIAA Forum, 2022. Available at: https://doi.org/10.2514/6.2022-3288

ROSEN, M. A.; DINCER, I. Analysis of Sustainable Energy Systems for Aviation Applications. Elsevier, 2021. Available at: https://doi.org/10.1016/B978-0-12-821226-9.00001-6

SCHOLZ, A. E.; MICHELMANN, J.; HORNUNG, M. Design, Operational and Environmental Assessment of a Hybrid-Electric Aircraft. AIAA SciTech, 2021. Available at: https://doi.org/10.2514/6.2021-0259

SILVA, R. F. et al. Sustainable Aviation Electrification: A Review. Sustainability, 15, 2023. Available at: https://doi.org/10.3390/su15010375

UNICA. Sugarcane Industrial Statistical Yearbook, 2023. Available at: https://apps.fas.usda.gov/newgainapi/

USDA. Biofuel Annual Report – Brazil, 2023. Available at: https://www.fas.usda.gov/data/brazil-biofuels-annual-11

VENKATRAM, N. M. et al. Modeling and Visualization of Zero-Impact Strategies for Aviation. AIAA SciTech, 2024. Available at: https://doi.org/10.2514/6.2024-1476

WATSON, M. et al. SAF Technologies, Policies & Costs: Review. J. Cleaner Production, 449, 2024. Available at: https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.141472

WINDHORST, R. D. et al. Analysis of Hybrid Electric Aircraft Operations in the National Airspace System. AIAA Aviation 2024 Forum, 2024. Available at: https://doi.org/10.2514/6.2024-3958

ZHANG, Y. et al. Key Technologies and Upgrade Strategies for eVol Aircraft Energy Storage Systems. Journal of Energy Storage, 62, 2023. Available at: https://doi.org/10.1016/j.est.2023.106999

ARTIGO 4

SUBINVESTIMENTO CRÔNICO EM INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES NO BRASIL: EVIDÊNCIAS MACROECONÔMICAS, TRAJETÓRIA ORÇAMENTÁRIA DO DNIT, RUPTURA DO FINANCIAMENTO PÓS-1988 E AGENDA ECONOMÉTRICA

Lucas Graziano Paniago (IDP e UnB)

RESUMO

Este artigo analisa o subinvestimento crônico em infraestrutura de transportes no Brasil, com ênfase na trajetória orçamentária do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT) e nas implicações macroeconômicas do déficit acumulado. Partindo de dados fiscais do Portal da Transparência e de séries de investimento sistematizadas pela CNT, ILOS e OCDE, documentamos que o investimento público federal em transporte atingiu apenas 0,13% do PIB em 2025, valor equivalente a um vigésimo do limiar estimado como necessário para estabilizar o estoque de capital, fixado em 1,96% do PIB ao ano por Frischtak e Mourão (2017). Um elemento estrutural ao qual a literatura tem dedicado atenção limitada nesse debate é a extinção do Fundo Rodoviário Nacional (FRN), criado pela Lei Joppert, em 1945, e extinto pela proibição constitucional de vinculação de receitas tributárias prevista na Constituição Federal de 1988. O FRN sustentou investimentos médios acima de 1,5% do PIB entre 1945 e 1980; sua extinção inaugurou o padrão de subexecução e dependência orçamentária que perdura até hoje. Sob a LOA 2026, o DNIT registrou pagamentos efetivos de R$ 117,6 milhões sobre R$ 14,46 bilhões autorizados (0,81%), mantendo o padrão estrutural de subexecução. Os custos logísticos, estimados pelo ILOS em R$ 1,96 trilhão (15,5% do PIB em 2025), representam o dobro do nível observado nos Estados Unidos. Revisamos a evidência econométrica internacional e brasileira sobre a relação capital público–produto e propomos uma agenda empírica com dados de painel estaduais para 1995–2025, incluindo GMM-System, modelos PMG, regressões espaciais e variáveis instrumentais baseadas em precipitação pluviométrica.

Palavras-chave: infraestrutura de transportes, capital público, Fundo Rodoviário Nacional, DNIT, custo logístico, dados em painel.

ABSTRACT

This paper analyzes chronic underinvestment in transport infrastructure in Brazil, focusing on the budget trajectory of the DNIT and the macroeconomic implications of the accumulated deficit. Drawing on fiscal data from the Federal Transparency Portal and investment-to-GDP series compiled by CNT, ILOS, and the OECD, we document that federal public investment in transport reached only 0.13% of GDP in 2025, roughly one-twentieth of the threshold estimated to stabilize the capital stock (1.96% of GDP per year; Frischtak and Mourão, 2017). A structurally overlooked element is the extinction of the Fundo Rodoviário Nacional (FRN), created by the Lei Joppert in 1945 and effectively terminated by the constitutional prohibition on earmarking of tax revenues introduced by the 1988 Constitution. The FRN sustained average transport investment above 1.5% of GDP between 1945 and 1980; its extinction inaugurated the pattern of underexecution and budget dependence that persists today. Under the LOA 2026, the DNIT recorded actual payments of BRL 117.6 million against BRL 14.46 billion authorized (0.81%), sustaining the structural underexecution pattern. Logistics costs estimated by ILOS at BRL 1.96 trillion (15.5% of GDP in 2025), are roughly double the level observed in the United States. We review international and Brazilian econometric evidence on the public capital–output relationship and propose an empirical research agenda with state-level panel data for 1995–2025, including System GMM, PMG estimators, spatial regressions, and precipitation-based instrumental variables.

Keywords: transport infrastructure, public capital, Fundo Rodoviário Nacional, DNIT, logistics cost, panel data

1. INTRODUÇÃO

A relação entre capital público em infraestrutura e crescimento econômico constitui um dos debates recorrentes da macroeconomia aplicada. Desde o trabalho de Aschauer (1989), que estimou elasticidades do produto em relação ao capital público entre 0,34 e 0,39 para a economia norte-americana, uma vasta literatura acumulou evidências de que investimentos em infraestrutura de transportes afetam positivamente a produtividade total dos fatores, reduzem custos logísticos, ampliam a conectividade de mercados e contribuem para a redução de desigualdades regionais (Calderón e Servén, 2004; Munnell, 1990; Gramlich, 1994; Romp e De Haan, 2007).

No contexto brasileiro, essa relação é particularmente relevante. O país possui uma das matrizes de transporte mais desequilibradas entre economias de porte comparável: cerca de 62% da carga é movimentada por rodovias, modalidade com maior custo unitário em longas distâncias, ao passo que ferrovias e hidrovias respondem por frações modestas (CNI/PNL, 2025). Esse desequilíbrio é, em larga medida, resultado de décadas de subinvestimento público crônico, não apenas no volume total, mas também na diversificação modal e na qualidade do ativo existente.

Os dados mais recentes ilustram a magnitude do problema. Em 2025, o investimento público federal efetivamente pago em infraestrutura de transporte correspondeu a 0,13% do Produto Interno Bruto (PIB), segundo cruzamento entre dados do IBGE e do Boletim de Conjuntura Econômica da Confederação Nacional do Transporte (CNT, 2026). No mesmo ano, os custos logísticos totais da economia brasileira chegaram a R$ 1,96 trilhão, 15,5% do PIB, segundo levantamento do ILOS (2025).

Um elemento estrutural ao qual literatura tem dedicado atenção limitada nesse debate diz respeito à ruptura do modelo de financiamento rodoviário inaugurado pelo Decreto-Lei nº 8.463, de 1945. Esse instrumento legal criou o Fundo Rodoviário Nacional (FRN) e reorganizou o Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (DNER), estabelecendo a vinculação da receita do Imposto Único sobre Combustíveis e Lubrificantes ao financiamento de rodovias. O FRN viabilizou a expansão da malha pavimentada brasileira de 423 quilômetros, em 1945, para 81 mil quilômetros, em 1980, com investimentos médios acima de 1,5% do PIB ao ano. A Constituição Federal de 1988, ao proibir genericamente a vinculação de receitas tributárias, extinguiu o mecanismo e inaugurou o padrão de dependência orçamentária que persiste até 2026.

Este artigo tem quatro objetivos. Primeiro, contextualizar a ruptura institucional de 1988 e suas consequências sobre o financiamento da infraestrutura de transportes. Segundo, sistematizar os dados disponíveis sobre a trajetória de investimento federal em transportes no Brasil, com ênfase no período de 2010 a 2026 e nos indicadores de execução orçamentária do DNIT. Terceiro, revisar a literatura econométrica sobre a relação entre capital público em infraestrutura e produto. Quarto, propor uma agenda de pesquisa quantitativa específica para o contexto brasileiro.

O artigo está organizado em seis seções, além desta introdução. A Seção 2 apresenta a ruptura do financiamento pós-1988 e o contexto histórico do FRN. A Seção 3 sistematiza os dados de investimento e execução orçamentária contemporâneos. A Seção 4 revisa a literatura teórica e econométrica. A Seção 5 detalha as especificações econométricas propostas. A Seção 6 discute implicações para política econômica. A Seção 7 conclui.

2. A RUPTURA DO FINANCIAMENTO EM TRANSPORTES: DO FUNDO RODOVIÁRIO NACIONAL À CONSTITUIÇÃO DE 1988

2.1. O modelo de vinculação de receitas e o Fundo Rodoviário Nacional (1945–1988)

O Decreto-Lei nº 8.463, de 27 de dezembro de 1945, conhecido como Lei Joppert, reorganizou o DNER e criou o Fundo Rodoviário Nacional (FRN), vinculando ao orçamento da autarquia o produto do Imposto Único Federal sobre Combustíveis e Lubrificantes Líquidos Minerais, importados e produzidos no país. O mecanismo era simples: quem utilizava as estradas pagava, por meio do imposto embutido no preço do combustível, uma contribuição que retornava integralmente ao setor rodoviário. A Taxa Rodoviária Única (TRU), cobrada sobre a propriedade de veículos automotores, complementava o financiamento. Estimativas da época apontam que a arrecadação do sistema chegou a representar até 7% do PIB em determinados exercícios (Conjur, 2004).

O resultado prático foi uma das maiores expansões rodoviárias registradas em qualquer economia em desenvolvimento no século XX. A malha pavimentada brasileira saltou de 423 quilômetros, em 1945, para 81 mil quilômetros, em 1980, com investimentos médios que estiveram acima de 1% do PIB durante todo o período, atingindo 1,8% do PIB em 1975. A lógica do sistema repousava no binômio pagamento-benefício: transporte progressivamente menos oneroso em função da melhoria contínua da malha viária, sem dependência dos ciclos políticos anuais do orçamento geral (Moreira, 1969; Revista do Direito Público, 2016).

O DNER, dotado de autonomia administrativa e financeira garantida pelo FRN, desenvolveu capacidade técnica e de planejamento que permitiu executar projetos de longa maturação de forma contínua. As superintendências regionais mantinham contratos de conservação de longo prazo, independentemente das oscilações da receita geral do Tesouro. Esse modelo institucional era, em essência, um fundo de investimento setorial com receita garantida por *design* constitucional e legal.

A degradação do modelo começou ainda na década de 1970. Com as crises do petróleo de 1973 e 1979 e a intensificação das pressões sobre o orçamento fiscal, o governo federal passou a redirecionar progressivamente parcelas do FRN para o Fundo Nacional de Desenvolvimento (FND) e outras rubricas de gasto geral. A partir de 1980, o investimento rodoviário começou a declinar como proporção do PIB, sinalizando que a vinculação legal havia sido contornada administrativamente antes de ser formalmente extinta.

2.2. A extinção constitucional e suas consequências imediatas (1988–1995)

A Constituição Federal de 1988 introduziu, no art. 167, inciso IV, a vedação à vinculação de receita de impostos a órgão, fundo ou despesa, com exceções específicas que não incluíam o setor rodoviário. O art. 36 do ADCT determinou a extinção dos fundos existentes que não fossem ratificados pelo Congresso Nacional no prazo de dois anos. O FRN não foi ratificado e foi extinto. Simultaneamente, o sistema tributário foi reformulado: O Imposto Único sobre Lubrificantes e Combustíveis Líquidos e Gasosos (IULCLG) foi absorvido pela nova sistemática do ICMS estadual, e a Taxa Rodoviária Única (TRU) foi reformulada e incorporada ao IPVA, tributo de

competência estadual, sem qualquer obrigação de retorno ao setor rodoviário federal (Revista do Direito Público, 2016).

A ruptura foi imediata. Sem receita própria vinculada, o DNER passou a depender integralmente das dotações anuais aprovadas na Lei Orçamentária Anual (LOA), competindo com todas as demais rubricas do orçamento federal. A consequência foi a queda abrupta dos investimentos na virada da década de 1980 para a de 1990, justamente quando a malha existente, construída com o FRN, começava a demandar ciclos intensivos de manutenção e restauração.

O governo federal ensaiou quatro tentativas de recompor alguma forma de financiamento vinculado ao setor. A Lei nº 7.712/1988 autorizou a cobrança de pedágios em rodovias federais, mas a receita ficou muito aquém do necessário. Em 1991, foi criada a Taxa de Conservação de Rodovias, declarada inconstitucional pelo Supremo Tribunal Federal ainda no mesmo ano. Um imposto sobre a importação de petróleo, criado em 1991, não tinha destinação setorial garantida. Uma proposta de imposto sobre combustíveis com receita exclusiva para rodovias, cogitada desde 1991, só resultaria na Contribuição de Intervenção no Domínio Econômico sobre Combustíveis (CIDE-Combustíveis), dez anos depois, em 2001 (ANPAD, 2006).

A CIDE-Combustíveis (Lei nº 10.336/2001) foi a tentativa mais elaborada de recriar o espírito do FRN: parte de sua receita deveria ser obrigatoriamente destinada a transporte, infraestrutura e meio ambiente. Porém, ao longo dos anos 2000 e 2010, emendas constitucionais progressivamente desvincularam sua receita do uso setorial, esvaziando o mecanismo. O DNIT, criado pela Lei nº 10.233/2001 para substituir o DNER, nasceu com arcabouço normativo atualizado, porém sem fonte própria de financiamento vinculada, herdando as atribuições do antecessor sem herdar o modelo que as tornara viáveis.

2.3. Legado institucional e trajetória do investimento (1988–2026)

A extinção do FRN estabeleceu o padrão que define até hoje o financiamento da infraestrutura rodoviária federal: dotações anuais disputadas no processo orçamentário geral, sujeitas a contingenciamentos discricionários, cortes de emenda de relator e bloqueios fiscais. O investimento em transportes, de variável estratégica de Estado com receita garantida, passou a ser uma variável residual do orçamento, a primeira a ser cortada em ciclos de ajuste fiscal.

Tabela 1 – Trajetória do investimento em infraestrutura de transportes no Brasil

Período / marco	Investimento em transporte	Observação
1945–1980 (média FRN)	>1,0% do PIB (máx. 1,8% em 1975)	Expansão de 423 km para 81 mil km pavimentados
1980–1988 (declínio FRN)	Queda progressiva	Desvio do FRN para FND e ajuste fiscal
1989–2000 (pós-CF/88)	<0,5% do PIB	Ruptura com vinculação; deterioração acelerada da malha
2010–2021 (média, transporte)	0,21% do PIB	Menor média entre 50 países analisados pela CNT (2026)
2021	0,06% do PIB	Patamar mínimo recente
2023–2024	R$ 26 bi acumulados	Retomada via PAC; melhor ICM da série (75,1%)
2025	0,13% do PIB	Recomposição parcial, ainda insuficiente
Necessidade estimada (OCDE)	3,7% do PIB/ano até 2030	Para eliminar o déficit acumulado
Limiar de preservação do estoque	1,96% do PIB/ano	Frischtak e Mourão (2017)

`Fontes: CNT (2026); ILOS (2025); OCDE; Frischtak e Mourão (2017); IPEA (2022); Revista do Direito Público (2016).

3. CONTEXTO MACROECONÔMICO E FISCAL CONTEMPORÂNEO

3.1. Execução orçamentária do DNIT: estrutura e dinâmica

O DNIT ocupa posição singular na arquitetura institucional do investimento federal em transportes. Como autarquia vinculada ao Ministério dos Transportes, é responsável pela gestão de 57 mil quilômetros de rodovias não concessionadas, além de atuar em obras ferroviárias, aquaviárias e de sinalização. Historicamente, a autarquia respondeu por aproximadamente 85% dos investimentos do Ministério dos Transportes (CNT, 2019).

A lógica orçamentária que governa o DNIT reflete uma tensão estrutural entre autorização (LOA), empenho (compromisso contratual) e pagamento (liquidação financeira). Em 2026, essa tensão atingiu proporções expressivas: enquanto a LOA autorizou R$ 14,46 bilhões, os empenhos acumulados no início do exercício totalizavam R$ 1,58 bilhão, e os pagamentos chegaram a R$ 117,6 milhões, 0,81% do total autorizado. A unidade orçamentária específica do Ministério dos Transportes sofreu corte de 50% em relação ao exercício anterior, passando de R$ 2,8 bilhões para R$ 1,4 bilhão, com o DNIT absorvendo redução adicional superior a R$ 700 milhões por decisão do relator da CMO.

Tabela 2 – Execução orçamentária do DNIT e indicador de qualidade da malha (ICM), 2022–2026

Indicador	2022	2023	2024	2025	2026 (parcial)
Orçamento autorizado (R$ bi)	6,14	~10,5	~13,8	16,62	14,46
Total empenhado (R$ bi)	~5,8	~9,9	~13,1	16,17	1,58
Total pago (R$ bi)	~4,1	~7,0	~9,5	10,34	0,12
Percentual pago / autorizado	~67%	~67%	~69%	~62%	0,81%*
ICM (% de rodovias boas)	52%	~62%	75,1%	69%	n.d.
Unidade orçamentária MT (R$ bi)	n.d.	n.d.	n.d.	2,8	1,4

(*) Dado parcial, início do exercício. Fontes: Portal da Transparência; DNIT/ICM; relatório CMO/LOA 2026.

A relação entre execução orçamentária e condições macroeconômicas merece atenção especial. Com a taxa Selic mantida em 15,0% ao ano em março de 2026, o custo de capital de giro para construtoras que operam no segmento de obras públicas é proibitivo: empresas com fluxos de caixa dependentes de cronogramas de desembolso federais não conseguem manter obras de forma contínua sem incorrer em custos financeiros que corroem as margens contratuais. O efeito é duplo: aumenta os pedidos de reequilíbrio econômico-financeiro, que atrasam obras, e reduz o número de licitantes em editais, o que eleva preços adjudicados.

3.2. Distribuição intermodal e distorção estrutural

A LOA 2026 consolida R$ 18,18 bilhões para investimentos da União e das estatais em transportes. A distribuição por modal revela uma assimetria que não pode ser explicada apenas por critérios técnicos de retorno econômico. O modal rodoviário concentra 65,17% dos recursos (R$ 11,85 bilhões), o aéreo responde por 21,26%, o aquaviário por 11,31% (R$ 461 milhões) e o ferroviário por apenas 2,26% (R$ 411 milhões). Dentro dos dois ministérios setoriais - Transportes e Portos e Aeroportos -, o rodoviário concentra 83% dos R$ 13,5 bilhões autorizados (CNI, 2026).

Tabela 3 – Distribuição modal do orçamento federal de transportes (LOA 2026) e participação na matriz de cargas

Modal	Participação LOA 2026	Participação na carga	Custo relativo (R$/tkm)
Rodoviário	65,17% (R$ 11,85 bi)	~62%	Referência (1,0x)
Aéreo (incl. estatais)	21,26% (R$ 3,87 bi)	~0,1%	~15x (carga geral)
Aquaviário / Portos	11,31% (R$ 461 mi)	~15%	~0,3x
Ferroviário	2,26% (R$ 411 mi)	~19%	~0,25–0,35x
Dutoviário	n.a.	~4,1%	~0,15x (granéis)

Fontes: CNT (2026); CNI (2026); PNL 2025; estimativas de custo: ILOS (2025).

4. IMPACTOS MACROECONÔMICOS: CUSTOS LOGÍSTICOS E EVIDÊNCIA EMPÍRICA

A conexão entre subinvestimento em infraestrutura de transportes e custos logísticos agregados é bem estabelecida na literatura. O ILOS (2025) estimou os custos logísticos totais do Brasil em R$ 1,96 trilhão (15,5% do PIB em 2025), valor que reflete a soma dos custos de transporte em todos os modais, armazenagem, estoques e atividades administrativas. Para fins de comparação, os EUA incorrem em custos logísticos da ordem de 8% do PIB. A diferença de aproximadamente 7,5 pontos percentuais do PIB representa, em valores de 2025, mais de R$ 900 bilhões anuais de custo adicional que a economia brasileira carrega em relação a economias de referência.

Tabela 4 – Impactos macroeconômicos do déficit de infraestrutura de transportes

Componente	Estimativa (2025)	Comparativo internacional
Custos logísticos totais (ILOS, 2025)	R$ 1,96 tri (15,5% PIB)	EUA: ~8% PIB; Alemanha: ~7,5% PIB
Crescimento do custo logístico (2014–2025)	De 10,4% para 15,5% do PIB	+5,1 p.p. em 11 anos
Demurrage nos portos (2024)	US$ 2,3 bi (~R$ 13 bi)	Gargalo nos acessos portuários
Exportações por via marítima (2025)	86,83% do total exportado (FOB)	MDIC (2026)
Empregos formais no setor (dez/2025)	2,9 milhões (recorde histórico)	~6% do total de vínculos formais
Custo dos acidentes em rodovias (2016–2025)	R$ 149,67 bilhões acumulados	Inclui atendimento, cargas, veículos

Fontes: ILOS (2025); CNT (2026); MDIC (2026); Valor Econômico / Revista Ferroviária (2025).

O *gap* entre o que o país investe e o que paga por não investir pode ser formalizado de maneira simples. Seja CL(t) o custo logístico como fração do PIB no período t e CL_bench o *benchmark* internacional. A estimativa de primeira ordem do custo de oportunidade anual é dada pela Equação 0. Para o Brasil, em 2025, com CL(t) = 0,155, CL_bench = 0,08 e PIB de R$ 12,7 trilhões, o diferencial alcança aproximadamente R$ 952 bilhões.

$$[\mathrm{CL}(t) - \mathrm{CL_bench}] \times \mathrm{PIB}(t) \approx \Delta \mathrm{CL}(t)$$
(Eq. 0)

5. REVISÃO DA LITERATURA ECONÔMICA E ECONOMÉTRICA

A relação entre capital público e produto agregado pode ser modelada dentro de um *framework* neoclássico padrão. Considere uma função de produção agregada do tipo Cobb-Douglas estendida, seguindo a especificação seminal de Aschauer (1989):

$$Y_it = A_it \times K_it^{\alpha} \times L_it^{\beta} \times G_it^{\gamma} \times \exp(\varepsilon_it)$$
(Eq. 1)

onde Y é o produto, K é o estoque de capital privado, L é o emprego, G é o estoque de capital público em infraestrutura de transportes, A representa a produtividade total dos fatores, e os expoentes α, β, γ são as elasticidades respectivas. Tomando logaritmos:

$$\ln Y_it = a_it + \alpha \cdot \ln K_it + \beta \cdot \ln L_it + \gamma \cdot \ln G_it + \varepsilon_it$$
(Eq. 2)

O parâmetro de interesse central é γ, a elasticidade do produto em relação ao estoque de capital público em infraestrutura. A estimação consistente de γ é o objeto de uma literatura que evoluiu da análise de séries temporais nacionais para painéis estaduais e *cross-country*, passando por funções de custo duais, especificações de crescimento endógeno e modelos espaciais.

As estimativas de γ na literatura apresentam ampla variação entre estudos. Aschauer (1989), utilizando dados de séries temporais para os EUA, estimou γ entre 0,34 e 0,39, valores que implicam produtividade marginal do capital público superior à do capital privado. A revisão sistemática de Bom e Ligthart (2008), baseada em metarregressão com 52 estimativas de 41 artigos entre 1983 e 2006, encontrou elasticidades médias entre 0,130 e 0,171, com ampla dispersão condicionada a escolhas metodológicas. Calderón, Moral-Benito e Servén (2015), utilizando o estimador PMG em um painel de 88 países para o período de 1960 a 2000, obtiveram elasticidades de longo prazo entre 0,07 e 0,10.

Tabela 5 – Seleção de estimativas da elasticidade produto-capital público ( ) na literatura internacional e brasileira

Estudo	Método	γ estimado	Fonte de dados
Aschauer (1989)	Séries temporais OLS	0,34 a 0,39	EUA, 1949–1985
Munnell (1990b)	Painel de estados EUA	0,15 a 0,34	EUA, estados, 1970–1986
Holtz-Eakin (1994)	Painel FE com efeitos individuais	<0,05 a não sig.	EUA, estados
Calderón e Servén (2004)	GMM Arellano-Bond	0,15 a 0,20	100+ países, 1960–2000
Bom e Ligthart (2008)	Meta-regressão (52 estimativas)	0,130 a 0,171	41 artigos, 1983–2006
Calderón et al. (2015)	PMG, Pesaran et al. (1999)	0,07 a 0,10	88 países, 1960–2000
Burke et al. (2018)	PMG (dados até 2017)	0,09 a 0,10	Painel internacional
Ferreira (1996)	Cointegração (Brasil)	~0,70	Brasil, 1980–1993
Silva et al. (2016)	Painel estático e GMM (Brasil)	sig. a 5% e 10%	Brasil, 26 estados, 1986–2009
Ribeiro e Santos (2023)	Painel espacial SAR/SDM (Brasil)	pos. sig. a 1%	Brasil, estados, dados FINBRA

Fontes: elaboração própria com base nos estudos citados.

No contexto brasileiro, a literatura econométrica sobre infraestrutura e crescimento desenvolveu-se a partir dos anos 1990, fortemente influenciada pelos trabalhos de Ferreira (1996) e Ferreira e Malliagros (1998), que estimaram elasticidades positivas e significativas entre estoque de infraestrutura e o PIB, usando técnicas de cointegração para séries temporais. Ferreira (1996) encontrou elasticidade de aproximadamente 0,70, coeficiente consistente com a literatura que documenta retornos decrescentes e maiores elasticidades para países com maior déficit de capital.

Ribeiro e Santos (2023) aplicaram metodologias econométricas espaciais estáticas e dinâmicas, incluindo SAR, SEM, SDM e GMM-System dinâmico espacial, com dados de investimentos consolidados de todos os modais de transporte para os estados brasileiros. Os resultados indicaram impacto positivo e significativo a 1% entre investimentos em infraestrutura de transportes e crescimento econômico, com evidência de transbordamentos espaciais. Uma lacuna importante na literatura brasileira é a escassez de estudos que utilizem estratégias de identificação robustas à endogeneidade com dados recentes (pós-2010).

6. AGENDA ECONOMÉTRICA: ESPECIFICAÇÕES, DADOS E IDENTIFICAÇÃO

6.1. Modelo base: função de produção agregada em painel

A especificação de referência para estimar o efeito do capital público em infraestrutura de transportes sobre o produto estadual é uma extensão da Equação 2 para dados em painel com efeitos fixos bidirecionais:

$$\ln PIB_{it} = \alpha_i + \lambda_t + \gamma \cdot \ln G_{it} + \varphi \cdot \ln K_{it} + \delta \cdot \ln H_{it} + X_{it}' \cdot \beta + \varepsilon_{it}$$

(Eq. 3)

onde PIB_{it} é o Produto Interno Bruto *per capita* do estado i no ano t (a preços constantes de 2010); α_i são efeitos fixos estaduais; λ_t são efeitos fixos temporais; G_{it} é o estoque de capital em infraestrutura de transportes do estado i no ano t; K_{it} é o estoque de capital privado; H_{it} é um indicador de capital humano; e X_{it} inclui controles adicionais.

6.2. Estimador GMM-System para controle de endogeneidade

O estimador GMM-System (Blundell e Bond, 1998) combina equações em níveis e em primeiras diferenças, instrumentalizando as variáveis endógenas com seus próprios defasamentos. A especificação dinâmica é:

$$\Delta \ln PIB_{it} = \rho \cdot \Delta \ln PIB_{i,t-1} + \gamma \cdot \Delta \ln G_{it} + \varphi \cdot \Delta \ln K_{it} + \delta \cdot \Delta \ln H_{it} + \Delta X_{it}' \cdot \beta + \Delta \varepsilon_{it}$$

(Eq. 4)

A validade dos instrumentos é testada pelo teste de Hansen (1982) e pela ausência de autocorrelação de segunda ordem no resíduo em diferenças (teste AR(2), de Arellano e Bond, 1991). Para painéis com alta persistência temporal, o estimador Pooled Mean Group (PMG), de Pesaran, Shin e Smith (1999), permite estimar relações de longo prazo com heterogeneidade nos coeficientes de curto prazo:

$$\Delta \ln PIB_{it} = \varphi_i \cdot (\ln PIB_{i,t-1} - \theta_i \cdot Z_{i,t-1}) + \Sigma \lambda_{ij} \cdot \Delta Z_{i,t-j} + u_{it}$$

(Eq. 5)

6.3. Instrumento exógeno: precipitação pluviométrica

Uma estratégia de identificação com maior credibilidade causal é o uso de variáveis de precipitação pluviométrica histórica como instrumento para a variação

no investimento em infraestrutura de rodovias. A lógica de identificação é a seguinte: anos de precipitação acima da média histórica regional aumentam os custos e reduzem o ritmo de execução de obras de terra, gerando variação exógena no fluxo de investimento efetivo em rodovias. O instrumento Z_it seria definido como o desvio da precipitação anual média do estado i no ano t em relação à sua própria média histórica de longo prazo, interagido com uma medida de intensidade de obras planejadas. Os dados estão disponíveis com resolução espacial e temporal adequada (INMET, ANA, reanálises ERA5 do ECMWF).

6.4. Modelos espaciais: transbordamentos e externalidades de rede

Três especificações espaciais são relevantes para o contexto brasileiro, seguindo Anselin (1988) e LeSage e Pace (2009). O Modelo Autorregressivo Espacial (SAR) é dado por:

$$\ln PIB_{it} = \rho \cdot W \cdot \ln PIB_{it} + \gamma \cdot \ln G_{it} + X_{it}' \cdot \beta + \alpha_i + \lambda_t + \varepsilon_{it}$$
(Eq. 6a)

O Modelo de Erro Espacial (SEM) captura dependência espacial nos erros:

$$\ln PIB_{it} = \gamma \cdot \ln G_{it} + X_{it}' \cdot \beta + \alpha_i + \lambda_t + u_{it}\,; \quad u_{it} = \lambda \cdot W \cdot u_{it} + \varepsilon_{it}$$
(Eq. 6b)

O Modelo de Durbin Espacial (SDM) é o mais geral e permite estimar efeitos diretos e indiretos de forma separada:

$$\ln PIB_{it} = \rho \cdot W \cdot \ln PIB_{it} + \gamma \cdot \ln G_{it} + \theta \cdot W \cdot \ln G_{it} + X_{it}' \cdot \beta + \theta_x \cdot W \cdot X_{it} + \alpha_i + \lambda_t + \varepsilon_{it}$$
(Eq. 6c)

6.5. Modelagem de custo logístico: função de custo dual

A abordagem de função de custo dual (Lynde e Richmond, 1993) estima o efeito da infraestrutura sobre os custos de produção das firmas:

$$\ln C_{it} = c_0 + c_w \cdot \ln w_{it} + c_q \cdot \ln Q_{it} + c_g \cdot \ln G_{it} + c_p \cdot \ln p_{it} + \mu_{it}$$
(Eq. 7)

onde C_it é o custo variável total do setor de transporte; w_it é o vetor de preços dos insumos; Q_it é o volume de carga transportada; G_it é o estoque de infraestrutura rodoviária; e p_it é o nível de preços relevante. O coeficiente $c_g < 0$ indicaria que melhores condições de infraestrutura reduzem os custos variáveis do setor.

6.6. Bases de dados disponíveis para o Brasil

Tabela 6 – Bases de dados recomendadas para estimação empírica da agenda proposta

Variável	Fonte	Cobertura	Observações
PIB estadual (Y_it)	IBGE/SCN Regionais	1985–atual	Deflatores estaduais: IPCA/IGP-M regional
Investimento federal em transportes	Portal Transparência/SIAFI	2000–atual	Empenho, liquidação e pagamento por estado
Estoque de capital público (rodovias)	DNIT (ext. pavim. por UF)	1980–atual	PIM com depreciação a ser estimada
Qualidade das rodovias (ICM/DNIT)	DNIT	2012–atual	Índice mensal por estado
Capital humano (H_it)	PNAD/PNADC/MTE-RAIS	1992–atual	Anos médios de estudo, PEA formal
Precipitação pluviométrica (instrumento)	INMET / ANA / ERA5-ECMWF	1950–atual	Estações meteorológicas; reanálise
Gastos estaduais em transportes	FINBRA/STN	1989–atual	Limitações de consistência pré-2000
Índice de custo logístico	ILOS (anual)	2004–atual	Componentes por modal e atividade
Exportações estaduais (abertura)	AliceWeb / MDIC	1989–atual	FOB por estado de origem

Fonte: elaboração própria.

7. IMPLICAÇÕES PARA POLÍTICA ECONÔMICA

Os resultados consolidados da literatura, combinados com a evidência fiscal documentada neste artigo e com a análise histórica do FRN, apontam para implicações de política econômica mensuráveis. Esta seção apresenta quatro dimensões quantitativas: o *gap* de manutenção do estoque, o custo acumulado da ruptura de 1988, o exercício de retorno marginal e os cenários de *catching-up.*

Primeiro: o *gap* de manutenção do estoque. O nível atual de investimento público federal em transportes (0,13% do PIB) é insuficiente para estabilizar o estoque de capital, que exigiria pelo menos 1,96% do PIB ao ano apenas para cobrir a depreciação e o crescimento da demanda (Frischtak e Mourão, 2017). A distância entre o nível atual e o limiar de preservação do estoque é de aproximadamente 1,83 pontos percentuais do PIB ao ano. Usando o PIB de 2025 (R$ 12,7 trilhões), isso equivale a um déficit anual de financiamento de aproximadamente R$ 232 bilhões, recursos que não são investidos e cujo efeito se acumula como deterioração líquida do estoque físico, expressa na elevação do percentual de rodovias em estado ruim ou péssimo e no crescimento das obras paralisadas por insuficiência de caixa.

Segundo: o custo acumulado da ruptura de 1988. Entre 1989 e 2025, trinta e seis anos sob o regime de discricionariedade orçamentária pós-FRN, o investimento médio em transportes situou-se próximo de 0,30% do PIB ao ano, contra uma média histórica de 1,50% no período 1945 a 1980. O diferencial médio de 1,20 p.p. do PIB ao ano, acumulado por três décadas e meia,

representa uma massa de recursos que deixou de ser alocada à infraestrutura. Aplicando esse diferencial ao PIB médio do período (conservadoramente estimado em R$ 5 trilhões em valores de 2025), o montante não investido acumulado desde a ruptura constitucional supera R$ 2,2 trilhões em termos constantes, cifra que contextualiza por que o estoque atual de infraestrutura de transportes está tão distante do necessário para uma economia da dimensão e complexidade do Brasil.

Terceiro: o retorno marginal e o exercício de *catching-up*. Sob a hipótese de que γ se situa em torno de 0,10, estimativa consolidada por Calderón et al. (2015) para países em desenvolvimento, e usando o PIB brasileiro de 2025 (aproximadamente R$ 12,7 trilhões), um aumento de 1 ponto percentual do PIB no estoque de capital público em transportes, implicando investimento adicional da ordem de R$ 127 bilhões desembolsados ao longo de quatro a cinco anos, geraria um aumento permanente de aproximadamente 0,10% no nível do PIB, equivalente a R$ 12,7 bilhões anuais adicionais no produto de estado estacionário. Com a elasticidade mais elevada estimada por Ferreira (1996) para o Brasil ($\gamma \approx 0,70$), o mesmo aumento de estoque geraria ganho permanente de 0,70% do PIB, ou R$ 88,9 bilhões anuais, embora essa estimativa superior deva ser tratada com cautela, dado o contexto de dados e período a que se refere. O intervalo plausível de retorno anual permanente por R$ 127 bilhões de investimento adicional situa-se, portanto, entre R$ 12,7 bilhões (cenário conservador, $\gamma = 0,10$) e R$ 88,9 bilhões (cenário otimista, $\gamma = 0,70$), com valor central em torno de R$ 25 a 30 bilhões ($\gamma \approx 0,20$, compatível com Bom e Ligthart, 2008).

Sob a hipótese de que γ se situa em torno de 0,10 (estimativa consolidada por Calderón et al., 2015, para países em desenvolvimento) e usando o PIB brasileiro de 2025 (aproximadamente R$ 12,7 trilhões), um aumento de 1 ponto percentual do PIB no estoque de capital público em transportes geraria um aumento permanente de aproximadamente 0,10% no nível do PIB, equivalente a R$ 12,7 bilhões anuais adicionais no produto de estado estacionário. Esse é um cálculo de ordem de grandeza, sujeito a todas as qualificações da literatura, mas ilustra que os retornos são expressivos e persistentes.

Quarto: os cenários de *catching-up* e a alocação intermodal. A OCDE estima que o Brasil precisaria de 3,7% do PIB ao ano até 2030 para eliminar o déficit acumulado de infraestrutura, o que implica investimento adicional de aproximadamente 3,57 p.p. do PIB acima do nível atual (0,13%), ou cerca de R$ 453 bilhões por ano, em valores de 2025, por cinco anos consecutivos. Um cenário mais gradual, de convergência ao limiar de preservação do estoque (1,96% do PIB), exigiria esforço adicional de 1,83 p.p. do PIB ao ano, equivalente a R$ 232 bilhões anuais acima do nível atual, também por prazo suficiente para cessar a deterioração. Um terceiro cenário, de esforço intermediário (investimento de 1,0% do PIB ao ano, ou R$ 127 bilhões adicionais), não eliminaria o déficit acumulado, mas estabilizaria sua taxa de crescimento e, sob $_2 = 0,10$, geraria retorno permanente de R$ 12,7 bilhões anuais no produto. Esses três cenários são sintetizados na Tabela 7. Sobre a alocação intermodal, vale destacar: sob as elasticidades consolidadas na literatura ($_2$ entre 0,07 e 0,17) e usando o diferencial de custo entre modais, o retorno econômico marginal de um real investido em ferrovias e hidrovias é substancialmente superior ao de um real adicional alocado em rodovias já existentes, especialmente para as regiões com maior intensidade de transporte de commodities em longas distâncias (Norte, Centro-Oeste, parte do Nordeste). A alocação orçamentária atual, que destina apenas 2,26% ao ferroviário, não reflete esse diferencial e representa, por si só, uma fonte de ineficiência alocativa independente do volume total investido.

Tabela 7 – Cenários de investimento em infraestrutura de transportes e retornos estimados

Cenário	Inv. adicional / ano	Horizonte mínimo	Retorno anual permanente (γ = 0,10)	Observação
Manutenção do estoque	+1,83 p.p. PIB (~R$ 232 bi)	Contínuo	~R$ 23,2 bi/ano	Cessa deterioração; não recupera déficit acumulado pós-1988
Esforço intermediário	+0,87 p.p. PIB (~R$ 127 bi)	4 a 5 anos	~R$ 12,7 bi/ano	Estabiliza o crescimento do déficit; gera retorno permanente expressivo
Catching-up acelerado (OCDE)	+3,57 p.p. PIB (~R$ 453 bi)	5 anos	~R$ 45,3 bi/ano	Elimina o déficit acumulado; requer revisão de arcabouço fiscal
Cenário atual (2025)	0,13% PIB (~R$ 16,5 bi)	–	Negativo (deterioração)	Estoque se deteriora ~1,83 p.p. PIB/ano, abaixo do limiar de reposição

Elaboração própria. Retornos calculados com $_2$ = 0,10 (Calderón et al., 2015) sobre o PIB de R$ 12,7 trilhões (2025). Cenário de manutenção do estoque: limiar de Frischtak e Mourão (2017). Catching-up acelerado: OCDE (2023).

8. CONCLUSÃO

Este artigo documentou, sistematizou e analisou o subinvestimento crônico em infraestrutura de transportes no Brasil a partir de quatro ângulos complementares: a ruptura histórica do modelo de financiamento com a extinção do FRN em 1988, a trajetória fiscal contemporânea do DNIT, o custo macroeconômico agregado mensurado pelos indicadores de logística e a literatura econométrica sobre as relações causais entre capital público e produto.

A extinção do FRN pela Constituição de 1988 representa um dos pontos de inflexão mais subestimados na história do investimento em infraestrutura no Brasil. A proibição de vinculação de receitas tributárias, justificada pela necessidade de flexibilidade fiscal e pela ruptura com as práticas do regime anterior, eliminou o único mecanismo que havia sustentado décadas de expansão consistente da malha viária. O padrão que se instaurou a partir de então, dependência da dotação anual disputada no orçamento geral, sujeição a contingenciamentos e bloqueios discricionários e tratamento do investimento como variável residual, é exatamente o que os dados de 2026 continuam a documentar.

A agenda econométrica proposta, que inclui funções de produção em painel com GMM-System e PMG, estratégias de IV via precipitação pluviométrica, modelos espaciais SAR/SEM/SDM e funções de custo dual, sugere um caminho para estimar com mais precisão o custo econômico do déficit de infraestrutura no Brasil. A produção de evidências econométricas robustas sobre esse tema tem valor não apenas acadêmico, mas também político-institucional: em debates orçamentários em que o investimento em infraestrutura compete com gastos de consumo, ter estimativas credenciadas do retorno marginal do capital público é um insumo para a argumentação técnica.

BIBLIOGRAFIA

ANPAD. Fundo Rodoviário Nacional e o financiamento da infraestrutura rodoviária federal brasileira: trajetória e ruptura institucional. In: ENCONTRO DA ANPAD, 30., 2006, Salvador. Anais... Rio de Janeiro: ANPAD, 2006.

ANSELIN, L. Spatial Econometrics: Methods and Models. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1988.

ARELLANO, M.; BOND, S. Some tests of specification for panel data: Monte Carlo evidence and an application to employment equations. Review of Economic Studies, v. 58, n. 2, p. 277-297, 1991.

ASCHAUER, D. A. Is public expenditure productive? Journal of Monetary Economics, v. 23, n. 2, p. 177-200, 1989.

BARRO, R. J. Government spending in a simple model of endogeneous growth. Journal of Political Economy, v. 98, n. 5, p. 103-125, 1990.

BERTUSSI, G. L.; ELLERY JUNIOR, R. Infraestrutura de transporte e crescimento econômico no Brasil. Journal of Transport Literature, v. 6, n. 4, p. 101-132, 2012.

BLUNDELL, R.; BOND, S. Initial conditions and moment restrictions in dynamic panel data models. Journal of Econometrics, v. 87, n. 1, p. 115-143, 1998.

BOM, P. R. D.; LIGTHART, J. E. How productive is public capital? A meta-analysis. CESIfo Working Paper, n. 2206, 2008.

BURKE, P. J.; STERN, D. I.; BRUNS, S. B. The impact of electricity on economic development: A macroeconomic perspective. International Review of Environmental and Resource Economics, v. 12, n. 1, p. 85-127, 2018.

CALDERÓN, C.; SERVÉN, L. The effects of infrastructure development on growth and income distribution. World Bank Policy Research Working Paper, n. 3400, 2004.

CALDERÓN, C.; MORAL-BENITO, E.; SERVÉN, L. Is infrastructure capital productive? A dynamic heterogeneous approach. Journal of Applied Econometrics, v. 30, n. 2, p. 177-198, 2015.

CNI – CONFEDERAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA. Relatório Mensal de Infraestrutura – fevereiro de 2026. Brasília: CNI, 2026.

CNI; PNL – CONFEDERAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA; PLANO NACIONAL DE LOGÍSTICA. Matriz de transportes e logística no Brasil 2025. Brasília: CNI, 2025.

CNT – CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE. Boletim de Conjuntura Econômica. Brasília: CNT, fevereiro de 2026.

CONJUR. Usuário de estradas paga imposto direto e indireto. Consultor Jurídico, 27 abr. 2004. Disponível em: https://www.conjur.com.br. Acesso em: mar. 2026.

FERREIRA, P. C. Investimento em infraestrutura no Brasil: fatos estilizados e relações de longo prazo. Pesquisa e Planejamento Econômico, v. 26, n. 2, p. 231-252, 1996.

FERREIRA, P. C.; MALLIAGROS, T. G. Impactos produtivos da infraestrutura no Brasil: 1950-1995. Pesquisa e Planejamento Econômico, v. 28, n. 2, p. 315-338, 1998.

FRISCHTAK, C.; MOURÃO, J. Uma estimativa do estoque de capital de infraestrutura

no Brasil. In: DE NEGRI, J. A.; ARAÚJO, B. C. (Org.). Tecnologia, exportação e emprego. Brasília: IPEA, 2017.

GRAMLICH, E. Infrastructure investment: A review essay. Journal of Economic Literature, v. 32, n. 3, p. 1176-1196, 1994.

HANSEN, L. P. Large sample properties of generalized method of moments estimators. Econometrica, v. 50, n. 4, p. 1029-1054, 1982.

HOLTZ-EAKIN, D. Public-sector capital and the productivity puzzle. Review of Economics and Statistics, v. 76, n. 1, p. 12-21, 1994.

ILOS – INSTITUTO DE LOGÍSTICA E SUPPLY CHAIN. Custos logísticos no Brasil 2025. Rio de Janeiro: ILOS, 2025.

IPEA – INSTITUTO DE PESQUISA ECONÔMICA APLICADA. Infraestrutura no Brasil: contexto histórico e principais desafios. Brasília: IPEA, 2022. (Capítulo 1 – Série Infraestrutura).

LESAGE, J.; PACE, R. K. Introduction to Spatial Econometrics. Boca Raton: CRC Press, 2009.

LYNDE, C.; RICHMOND, J. Public capital and total factor productivity. International Economic Review, v. 34, n. 2, p. 401-414, 1993.

MOREIRA, R. B. O Fundo Rodoviário Nacional. Rio de Janeiro: IPEA, 1969.

MUNNELL, A. H. Why has productivity growth declined? Productivity and public investment. New England Economic Review, jan./fev. 1990, p. 3-22, 1990.

OCDE – ORGANIZAÇÃO PARA A COOPERAÇÃO E DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO. Infrastructure Investment and Growth: Brazil in International Context. Paris: OECD, 2023.

PESARAN, M. H.; SHIN, Y.; SMITH, R. Pooled mean group estimation of dynamic heterogeneous panels. Journal of the American Statistical Association, v. 94, n. 446, p. 621-634, 1999.

REVISTA DO DIREITO PÚBLICO. Uma análise sobre o financiamento da infraestrutura rodoviária por meio da utilização de parcerias público-privadas. Revista do Direito Público, Londrina, v. 11, n. 3, p. 150-188, dez. 2016.

RIBEIRO, M. R. P.; SANTOS, L. M. S. Investimento em infraestrutura de transportes e crescimento econômico: uma análise espacial dos estados brasileiros. Revista Brasileira de Estudos Regionais e Urbanos, v. 17, n. 1, p. 1-35, 2023.

ROCHA, F.; GIUBERTI, A. C. Composição do gasto público e crescimento econômico: uma avaliação macroeconômica da qualidade dos gastos dos estados brasileiros. Economia Aplicada, v. 11, n. 4, p. 463-485, 2007.

ROMP, W.; DE HAAN, J. Public capital and economic growth: A critical survey. Perspektiven der Wirtschaftspolitik, v. 8, n. S1, p. 6-52, 2007.

SILVA, M. V. B. da; MARTINS, G. A.; NEDER, H. D. Investimentos em infraestrutura de transportes e desigualdades regionais no Brasil: uma análise dos impactos do PAC. Revista de Economia Política, v. 36, n. 4, p. 840-866, 2016.

STRAUB, S. Infrastructure and development: A critical appraisal of the macro-level literature. World Bank Policy Research Working Paper, n. 4590, 2008.

ARTICLE 4

CHRONIC UNDERINVESTMENT IN TRANSPORT INFRASTRUCTURE IN BRAZIL: MACROECONOMIC EVIDENCE, DNIT BUDGET TRACK-RECORD, POST-1988 FUNDING DISRUPTION, AND ECONOMETRIC AGENDA

Lucas Graziano Paniago (IDP e UnB)

RESUMO

Este artigo analisa o subinvestimento crônico em infraestrutura de transportes no Brasil, com ênfase na trajetória orçamentária do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT) e nas implicações macroeconômicas do déficit acumulado. Partindo de dados fiscais do Portal da Transparência e de séries de investimento sistematizadas pela CNT, ILOS e OCDE, documentamos que o investimento público federal em transporte atingiu apenas 0,13% do PIB em 2025, valor equivalente a um vigésimo do limiar estimado como necessário para estabilizar o estoque de capital, fixado em 1,96% do PIB ao ano por Frischtak e Mourão (2017). Um elemento estrutural ao qual a literatura tem dedicado atenção limitada nesse debate é a extinção do Fundo Rodoviário Nacional (FRN), criado pela Lei Joppert, em 1945, e extinto pela proibição constitucional de vinculação de receitas tributárias prevista na Constituição Federal de 1988. O FRN sustentou investimentos médios acima de 1,5% do PIB entre 1945 e 1980; sua extinção inaugurou o padrão de subexecução e dependência orçamentária que perdura até hoje. Sob a LOA 2026, o DNIT registrou pagamentos efetivos de R$ 117,6 milhões sobre R$ 14,46 bilhões autorizados (0,81%), mantendo o padrão estrutural de subexecução. Os custos logísticos, estimados pelo ILOS em R$ 1,96 trilhão (15,5% do PIB em 2025), representam o dobro do nível observado nos Estados Unidos. Revisamos a evidência econométrica internacional e brasileira sobre a relação capital público–produto e propomos uma agenda empírica com dados de painel estaduais para 1995–2025, incluindo GMM-System, modelos PMG, regressões espaciais e variáveis instrumentais baseadas em precipitação pluviométrica.

Palavras-chave: infraestrutura de transportes, capital público, Fundo Rodoviário Nacional, DNIT, custo logístico, dados em painel.

ABSTRACT

This paper analyzes chronic underinvestment in transport infrastructure in Brazil, focusing on the budget trajectory of the DNIT and the macroeconomic implications of the accumulated deficit. Drawing on fiscal data from the Federal Transparency Portal and investment-to-GDP series compiled by CNT, ILOS, and the OECD, we document that federal public investment in transport reached only 0.13% of GDP in 2025, roughly one-twentieth of the threshold estimated to stabilize the capital stock (1.96% of GDP per year; Frischtak and Mourão, 2017). A structurally overlooked element is the extinction of the Fundo Rodoviário Nacional (FRN), created by the Lei Joppert in 1945 and effectively terminated by the constitutional prohibition on earmarking of tax revenues introduced by the 1988 Constitution. The FRN sustained average transport investment above 1.5% of GDP between 1945 and 1980; its extinction inaugurated the pattern of underexecution and budget dependence that persists today. Under the LOA 2026, the DNIT recorded actual payments of BRL 117.6 million against BRL 14.46 billion authorized (0.81%), sustaining the structural underexecution pattern. Logistics costs estimated by ILOS at BRL 1.96 trillion (15.5% of GDP in 2025), are roughly double the level observed in the United States. We review international and Brazilian econometric evidence on the public capital–output relationship and propose an empirical research agenda with state-level panel data for 1995–2025, including System GMM, PMG estimators, spatial regressions, and precipitation-based instrumental variables.

Keywords: transport infrastructure, public capital, Fundo Rodoviário Nacional, DNIT, logistics cost, panel data

1. INTRODUCTION

The relationship between public capital in infrastructure and economic growth is a matter of ongoing discussion in applied macroeconomics. Since the work of Aschauer (1989), who estimated product elasticities vs public capital at 0.34 to 0.39 for the US economy, a huge body of literature has built up evidence that investments in transport infrastructure positively affect total factor productivity, with lower logistics costs and better market connectivity, while helping iron out regional inequalities (Calderón and Servén, 2004; Munnell, 1990; Gramlich, 1994; Romp and De Haan, 2007).

In the Brazilian context, this relationship is particularly relevant. With one of the most uneven transport matrixes among economies of comparable size, about 62% of its cargoes are carried by road, a long-distance option with the highest unit costs, while railways and waterways account for only modest fractions (CNI/PNL, 2025). This imbalance is due largely to decades of chronic public underinvestment, not only in total volumes, but also for mode diversification and asset quality.

The most recent data illustrate the magnitude of this problem. In 2025, federal government investments in transport infrastructure that were actually paid accounted for 0.13% of Brazil's Gross Domestic Product (GDP), according to data released by the Brazilian Institute for Geography and Statistics (IBGE) and the *Conjuntura Econômica* bulletin published by the National Transport Confederation (CNT, 2026). That same year, the total logistics costs of the Brazilian economy reached 15.5% of its GDP at BRL 1.96 trillion, according to an ILOS survey (2025).

A structural element to which literature has devoted limited attention in this discussion is the disruption of the road financing model ushered in in 1945 by Decree-Law Nº 8,463. Introducing the National Highways Fund (FRN) and restructuring the National Highways Department (DNER), this law also linked Single Fuels and Lubricants Tax revenues to highway financing. The FRN underwrote the expansion of Brazil's paved highway network, expanding from a mere 423 kilometres in 1945 to 81,000 kilometres in 1980, with average annual investments topping 1.5% of GDP. Through an across-the-board ban on tied tax revenues, Brazil's 1988 Constitution eliminated this mechanism, paving the way for the budgetary dependence patterns that still persist today.

This paper has four purposes. First, to contextualise the 1988 institutional disruption and its consequences on transport infrastructure financing. Second, to systematise the available data on federal transport investment trends in Brazil, particularly between 2010 and 2026, together with DNIT budget implementation indicators. Third, to review econometric literature on relationships between public capital in infrastructure and outcomes. Fourth, to propose a quantitative research agenda specific to the Brazilian context.

The paper is organised into six sections, in addition to this Introduction. Section 2 presents a post-1988 funding disruption and the historical context of the FRN. Section 3 systematises contemporary investment and Budget implementation data. Section 4 reviews the theoretical and econometric literature. Section 5 describes the proposed econometric specifications. Section 6 discusses implications for economic policy, and Section 7 presents the Conclusions.

2. TRANSPORT FINANCING DISRUPTION: FROM THE NATIONAL HIGHWAYS FUND TO THE 1988 CONSTITUTION

2.1. Tied revenues model and the National Highways Fund (1945 – 1988)

Known as the Joppert Act and promulgated on December 27, 1945, Decree-Law Nº 8,463, restructured the DNER and set up the National Highways Fund (FRN). It tied Single Federal Liquid Mineral Fuels and Lubricants Tax revenues to this Department's budget, for locally produced and imported goods. The mechanism was simple: through a tax embedded in fuel prices, road users contributed amounts that were channelled back to the road sector in full. This funding was supplemented and by the Single Highway Tax (TRU) levied on motor vehicle ownership. Contemporaneous estimates indicated that system revenues reached up to represent up to 7% of GDP in some years (Conjur, 2004).

Brazilian paved highway network jumped from just 423 kilometres in 1945 to 81,000 kilometres in 1980; average investments topped 1% of GDP throughout this period, peaking in 1975 at 1.8% of GDP. The system logic was rooted in a payment-benefit binomial: progressively less expensive transport due to continuous improvement of the highway network, without depending on annual budget cycles swayed by politics (Moreira, 1969; Revista do Direito Público, 2016).

Endowed with administrative and financial autonomy guaranteed by the FRN, the DNER developed the technical and planning capabilities needed for the continuous implementation of slow-maturing projects. Its regional offices signed long-term conservation contracts, regardless of fluctuations in overall Treasury revenues. This institutional model was essentially a sector-specific investment fund with revenues assured by constitutional and legal design.

However, this model began to crumble during the 1970s, undermined by the 1973 and 1979 oil crises. As fiscal budget pressures rose, the Brazilian government began to redirect increasingly large amounts from the FRN to the National Development Fund (FND) and other general expenditure items. From 1980 onwards, highway investments began to shrink as a proportion of GDP, indicating that the legal link had been administratively sidestepped, even before its formal elimination.

2.2. Constitutional elimination and its immediate consequences (1988 – 1995)

Brazil's 1988 Constitution introduced (in Article 167, item IV) a ban on earmarking tax revenues for any specific department, agency, fund, or expense, with specific exceptions that did not include the highway sector. Article 36 of the Temporary Constitutional Provisions Act (ACDT) ordered the closure of all funds not ratified by the Brazilian Congress within two years. As it was not ratified, FRN was then eliminated. At the same time, Brazil's tax system was restructured, and the Single Tax on Lubricants and Liquid and Gas Fuels (IULCLG) was absorbed by the new State Tax (ICMS) system. The Single Highway Tax (TRU) was reformulated and folded into the Automotive Vehicles Ownership (IPVA) state tax, with no payback obligation to federal highway sector (Revista do Direito Público, 2016).

The disruption was immediate. Without its own tied revenues, the DNER became entirely dependent on the budget allocations approved in each Annual Budget

Act (LOA), competing with all the other federal budget items. The consequence was a sharp drop in investments during the late 1980s and early 1990s, which was exactly when more intensive maintenance and repair cycles were needed for the existing highway network built with FRN funding.

The Brazilian government has made four attempts to re-establish some type of tide funding for this sector. In 1988, Law Nº 7,712 authorised tolls on federal highways, but these revenues fell far short of the required amounts. In 1991, the Highway Conservation Fee was introduced, but was quickly declared unconstitutional by the Federal Supreme Court. That same year a tax on oil imports was introduced, but with no guaranteed recipient sectors. Under consideration since 1991, a proposed fuel tax with revenues earmarked exclusively for highways resulted only in the Economic Domain Intervention Levy on Fuels (CIDE-Fuels), ten years later, in 2001 (ANPAD, 2006).

Introduced through Law Nº 10,336/2001, the CIDE-Fuels Levy was the most elaborate attempt to recreate the spirit of the FRN, with portions of its revenues necessarily allocated to transport, infrastructure, and the environment. However, constitutional amendments steadily uncoupled its revenues from sector-specific use throughout the 2000s and 2010s, depleting this mechanism. Established by Law Nº 10,233/2001 to replace the DNER, the National Transport Infrastructure Department (DNIT) was set up with an updated regulatory framework, but still lacking its own tied funding sources. Consequently, it inherited all the duties and responsibilities of its predecessor, but without the model that had underpinned its feasibility.

2.3. Institutional legacy and investment track-record (1988 – 2026)

The elimination of the FRN established the standard that still defines federal highway infrastructure funding: annual budget allocations entangled in the competitive general budget process, subject to discretionary contingencies, cuts through ministerial amendments, and fiscal blocks. Investments in transport have shifted from being a strategic State variable with guaranteed revenues to an outlying budget variable that is first in line for cuts when fiscal adjustments are needed.

Table 1 – Timeline of Transport Infrastructure Investments in Brazil

Period/milestone	Investments in transport	Remarks
1945 – 1980 (FRN average)	>1.0% of GDP (1.8% in 1975)	Expansion from 423 km to 81,000 km paved highways
1980 – 1988 (decline FRN)	Steady drop	Switch from FRN to FND and fiscal adjustment
1989 – 2000	0,21% do PIB	Menor média entre 50 países analisados pela CNT (2026)
(post 1988 Constitution)	<0.5% of GDP	Disruption in tied revenues, with rapid deterioration of the highway network
2010 – 2021 (average, carryover)	0.21% of GDP	Lowest average among 50 countries analysed by CNT (2026)
2021	0.06% of GDP	Recent minimum level
2023 – 2024	BRL 26 billion accumulated	Resumption through Accelerated Growth Program (PAC); best MCI in the dataset (75.1%)
2025	0.13% of GDP	Partial recovery, but still insufficient
Estimated Need (OECD)	3.7% of GDP/year by 2030	Elimination of the accumulated shortfall
Inventory preservation threshold	1.96% of GDP/year	Frischtak and Mourão (2017)

Sources: CNT (2026); ILOS (2025); OECD; Frischtak and Mourão (2017); IPEA (2022); Journal of Public Law (2016).

3. CONTEMPORARY MACROECONOMIC AND FISCAL CONTEXT

3.1. DNIT budget implementation: structure and dynamics

The National Transport Infrastructure Department (DNIT) holds a unique position in Brazil's federal transport investment institutional architecture. As an independent agency under the Ministry of Transport, it manages 57,000 kilometres of non-concession highways, in addition to working on rail, waterway and signage projects. Historically, this department has handled around 85% of Transport Ministry investments (CNT, 2019).

The budgetary logic governing the DNIT reflects structural stresses among authorisations (Annual Budget Acts), commitments (contracted payouts), and payments (financial settlements). In 2026, these stresses reached significant proportions: while the Annual Budget Act authorised BRL 14.46 billion, accumulated commitments at the start of the year totalled BRL 1.58 billion, and payments reached BRL 117.6 million, only 0.81% of the authorised total. The specific budget unit at the Ministry of Transport suffered a 50% cut compared to the previous year, down from BRL 2.8 billion to BRL 1.4 billion, with the DNIT absorbing an additional reduction of more than BRL 700 million under a decision handed down by the Mixed Public Plans, Budgets and Oversight Commission (CMO) rapporteur.

Table 2 – DNIT Budget Implementation and Highway Network Quality Indicators (ICM), 2022 – 2026

Indicator	2022	2023	2024	2025	2026 (parcial)
Authorised budget (BRL billion)	6,14	~10.5	~13.8	16.62	14.46
Total committed (BRL billion)	~5.8	~9.9	~13.1	16.17	1.58
Total paid (BRL billion)	~4.1	~7.0	~9.5	10.34	0.12
Percentage paid/authorised	~67%	~67%	~69%	~62%	0.81%*
ICM (%good roads)	52%	~62%	75.1%	69%	N.A.
MinTran budget unit (BRL billion)	N.A.	N.A.	N.A.	2.8	1.4

(*) Partial data, start of fiscal year.
Sources: Transparency Portal; DNIT/ICM; CMO/LOA 2026 Report.

The relationship between budget implementation and macroeconomic conditions warrants special attention. With the annual SELIC rate at 15.0% in March 2026, working capital costs are prohibitive for construction companies operating in the public works segment: companies with cash flows dependent on federal disbursement schedules are unable to work continuously on projects without incurring financial costs that erode contractual margins. The effect is twofold: it ramps up requests for economic and financial rebalancing, which delay works, while lowering the number of bidders in public tenders, which in turn hikes up concession prices.

3.2. Intermodal distribution and structural distortion

The 2026 Budget Act allocates BRL 18.18 billion for investments in transport by the federal government and state-owned companies. Distribution by mode discloses an asymmetry that cannot be explained by only technical criteria related to economic paybacks. Road transport absorbs 65.17% (BRL 11.85 billion) of these funds, airborne transport accounts for 21.26%, waterways take 11.31% (BRL 461 million) and rail gets only 2.26% (BRL 411 million). In the two ministries controlling this sector – Transport, and Ports and Airports - road transport absorbs 83% of the authorised amount of BRL 13.5 billion (CNI, 2026).

Table 3 – Mode Distribution of Federal Transport Budget (LOA 2026) and Cargo Matrix Shares

Mode	LOA 2026 Participation	Cargo Sharing	Relative cost (BRL /tkm)
Road	65.17% (BRL 11.85 billion)	~62%	Reference (1,0x)
Air (incl. state-owned)	21.26% (BRL 3.87 billion)	~0.1%	~15x (general load)
Waterways / Ports	11.31% (BRL 461 million)	~0,15x	~0.3x
Rail	2.26% (BRL 411 million)	~19%	~0.25 - 035x
Pipelines	n.a.	~4.1%	~0.15x (bulk)

Sources: CNT (2026); CNI (2026); PNL 2025; cost estimates: ILOS (2025).

4. MACROECONOMIC IMPACTS: LOGISTICS COSTS AND EMPIRICAL EVIDENCE

The link between underinvestment in transport infrastructure and aggregate logistics costs is well established in the literature. ILOS (2025) estimated Brazil's total logistics costs at BRL 1.96 trillion (15.5% of GDP in 2025), a figure that reflects the sum of transport costs for all modes, as well as storage, inventories, and back-office activities. In comparison, US logistics costs reach around 8% of its GDP. This difference of approximately 7.5 percentage points represents more than BRL 900 billion a year (at 2025 values) of additional costs borne by the Brazilian economy, compared to reference economies.

Tabela 4 – Impactos macroeconômicos do déficit de infraestrutura de transportes

Componente	Estimativa (2025)	Comparativo internacional
Total logistics costs (ILOS, 2025)	BRL 1.96 trillion (15.5% GDP)	USA: ~8% GDP; Germany: ~7.5% GDP
Logistics cost growth (2014 – 2025)	10.4% to 15.5% of GDP	+5.1 p.p. in 11 years
Port demurrage (2024)	US$ 2.3 billion (~BRL 13 billion)	Port access bottlenecks
Seaborne exports (2025)	86.83% of total exports (FOB)	Ministry for Development, Industry and Foreign Trade (MDIC) (2026)
Formal jobs in the sector (December 2025)	2,9 milhões (recorde histórico)	~6% do total de vínculos formais
Highway accident costs (2016 – 2025)	BRL 149.67 billion accumulated	Includes responses, cargos, and vehicles

Sources: ILOS (2025); CNT (2026); MDIC (2026); Valor Econômico / Revista Ferroviária (2025).

Calculating the gap between Brazil's investments and the costs of not investing is easy: if CL(t) is the logistics cost as a fraction of GDP in period t and CL_bench is the international benchmark, the first-order estimate of the annual opportunity cost is given by Equation 0. For Brazil in 2025, with CL(t) = 0.155, CL_bench = 0.08 and a GDP of BRL 12.7 trillion, this gap is around BRL 952 billion.

$$[\mathrm{CL}(t) - \mathrm{CL_bench}] \times \mathrm{GDP}(t) \approx \Delta \mathrm{CL}(t)$$
(Eq. 0)

5. REVIEW OF THE ECONOMIC AND ECONOMETRIC LITERATURE

The relationship between public capital and aggregate output may be modelled within a standard neoclassical framework. For an extended Cobb-Douglas aggregate production function following Aschauer's (1989) seminal specification:

$$Y_it = A_it \times K_it^{\alpha} \times L_it^{\beta} \times G_it^{\gamma} \times \exp(\varepsilon_it)$$
(Eq. 1)

where Y is the product, K is the private capital inventory, L is employment, and G is public capital inventory in transport infrastructure, A represents total factor productivity, and the α, β, and γ exponents are the respective elasticities. For logarithms:

$$\ln Y_it = a_it + \alpha \cdot \ln K_it + \beta \cdot \ln L_it + \gamma \cdot \ln G_it + \varepsilon_it$$
(Eq. 2)

The core parameter is γ, as product elasticity in relation to public capital inventory in infrastructure. Consistent γ

estimation is addressed by a literature that has evolved from nationwide time series analyses to state and cross-country panels, including dual cost functions, endogenous growth specifications, and spatial models.

Estimates of γ in the literature vary widely among studies. Using time series data for the USA, Aschauer (1989) estimated γ at between 0.34 and 0.39, with these values implyingGng a marginal productivity for public capital that is higher than the private capital figures. Based on meta-regression, a systematic review by Bom and Ligthart (2008) examined 52 estimates in 41 papers between 1983 and 2006, finding mean elasticities between 0.130 and 0.171, with methodological choices resulting in wide dispersion. Using the Pooled Mean Group (PMG) estimator in a panel of 88 countries for 1960 to 2000, Calderón, Moral-Benito, and Servén (2015) obtained long-term elasticities between 0.07 and 0.10.

Table 5 – Estimates of Product-Public Capital Elasticity (y) in International and Brazilian Literature

Study	Method	Estimated	Data Source
Aschauer (1989)	OLS time series	0.34 to 0.39	USA, 1949 – 1985
Munnell (1990b)	USA States Panel	0.15 to 0.34	USA, States, 1970 – 1986
Holtz-Eakin (1994)	FE panel with individual effects	<0.05 to non-sig.	USA, States
Calderón and Servén (2004)	GMM Arellano-Bond	0.15 to 0.20	100+ countries, 1960 – 2000
Good and Ligthart (2008)	Meta-regression (52 estimates)	0.130 to 0.171	41 papers, 1983 – 2006
Calderón et al. (2015)	PMG, Pesaran et al. (1999)	0.07 to 0.10	88 countries, 1960 – 2000
Burke et al. (2018)	PMG (data up to 2017)	0.09 to 0.10	International panel Brazil, 1980 – 1993
Ferreira (1996)	Cointegration (Brazil)	~0.70	Brazil, 1980 – 1993
Silva et al. (2016)	Static Panel & GMM (Brazil)	sig. to 5% and 10%	Brazil, 26 states, 1986 – 2009
Ribeiro and Santos (2023)	SAR/SDM Space Panel (Brazil)	pos. sig. to 1%	Brazil, states, FINBRA data

Sources: prepared by the authors based on the above-mentioned studies.

In the Brazilian context, the econometric literature on infrastructure and growth has progressed since the 1990s, strongly influenced by the work of Ferreira (1996) and Ferreira and Malliagros (1998), who estimated positive and significant elasticities between infrastructure inventory and GDP, using cointegration techniques for time series. Ferreira (1996) found an elasticity of approximately 0.70, a coefficient consistent with the literature that documents diminishing returns and greater elasticities for countries with higher capital shortfalls.

Ribeiro and Santos (2023) applied static and dynamic spatial econometric methodologies, including the Spatial Autoregressive Model (SAR), the Spatial Error Model (SEM), the Spatial Durbin Model (SDM), and the Spatial Dynamic Generalized Method of Moments (GMM) System, with consolidated investment data from all modes of transport for Brazilian States. The findings indicated positive and significant impacts at 1% for investments in transport infrastructure and economic growth, with evidence of spatial spillovers. An important gap in the Brazilian literature is the scarcity of studies using robust endogeneity identification strategies with recent data (post-2010).

6. ECONOMETRIC AGENDA: SPECIFICATIONS, DATA, AND IDENTIFICATION

6.1. Base model: aggregate panel production function

The reference specification for estimating the effects on state output of public capital invested in transport infrastructure is an extension of Equation 2 for panel data with bidirectional fixed effects:

$$\ln GDP_it = \alpha_i + \lambda_t + \gamma \cdot \ln G_it + \varphi \cdot \ln K_it + \delta \cdot \ln H_it + X_it' \cdot \beta + \varepsilon_it$$

(Eq. 3)

where GDP_it is the *per capita* Gross Domestic Product of state i in year t (at constant 2010 prices); α_i are state fixed effects; λ_t are temporal fixed effects; G_it is the capital inventory in transport infrastructure of state i in year t; K_it is the inventory of private capital; H_it is a human capital indicator; and X_it includes additional controls.

6.2. GMM-System estimator for endogeneity control

The Spatial Dynamic Generalized Method of Moments (GMM) System ing (Blundell and Bond, 1998) combines equations in levels and in first differences, instrumentalising endogenous variables with their own lags. The dynamic specification is:

$$\Delta \ln GDP_it = \rho \cdot \Delta \ln GDP_\{i,t-1\} + \gamma \cdot \Delta \ln G_it + \varphi \cdot \Delta \ln K_it + \delta \cdot \Delta \ln H_it + \Delta X_it' \cdot \beta + \Delta \varepsilon_it$$

(Eq. 4)

Instrument validity is checked by the Hansen test (1982) and the absence of second-order autocorrelation in carryover differences (AR(2) test, Arellano and Bond, 1991). For panels with high temporal persistence, the Pooled Mean Group (PMG) estimator of Pesaran, Shin and Smith (1999) allows estimates of long-term relationships with heterogeneity for short-term coefficients:

$$\Delta \ln GDP_it = \varphi_i \cdot (\ln GDP_\{ I,T -1\} - \theta \rangle \cdot Z_\{ I,T -1\}) + \Sigma \lambda_ij' \cdot \Delta Z_\{ I,T -j\} + u_it$$

(Eq. 5)

6.3. Exogenous instrument: rainfall

An identification strategy with greater causal credibility is the use of historical rainfall variables as a highway infrastructure investment variations instrument. The identification logic is as follows: years with rainfall heavier than historic regional averages ramp up costs, with slower earthwork implementation, triggering exogenous variations in effective highway investment flows. The Z_it instrument is defined as the deviation in the average

annual rainfall for state i in year t in relation to its own long-term historic mean, interacted with a measure of the intensity of planned works. Data are available with adequate spatial and temporal resolution (INMET, ANA, ERA5 reanalyses of ECMWF).

6.4. Spatial models: network spillovers and externalities

Three spatial specifications are relevant to the Brazilian context, following Anselin (1988) and LeSage and Pace (2009). The Spatial Autoregressive Model (SAR) is given by:

$$\ln GDP_it = \rho \cdot W \cdot \ln GDP_it + \gamma \cdot \ln G_it + X_it' \cdot \beta + \alpha_i + \lambda_t + \varepsilon_it$$

(Eq. 6a)

The Spatial Error Model (SEM) captures spatial dependency on errors:

$$\ln GDP_it = \gamma \cdot \ln G_it + X_it' \cdot \beta + \alpha_i + \lambda_t + u_it;\ u_it = \lambda \cdot W \cdot u_it + \varepsilon_it$$

(Eq. 6b)

The Spatial Durbin Model (SDM) is the most general and allows direct and indirect effects to be estimated separately:

$$\ln GDP_it = \rho \cdot W \cdot \ln GDP_it + \gamma \cdot \ln G_it + \theta \cdot W \cdot \ln G_it + X_it' \cdot \beta + \theta_x \cdot W \cdot X_it + \alpha_i + \lambda_t + \varepsilon_it$$

(Eq. 6c)

6.5. Logistics cost modelling: dual cost function

The dual-cost function approach (Lynde and Richmond, 1993) estimates the effect of infrastructure on corporate production costs:

$$\ln C_it = c_0 + c_w \cdot \ln w_it + c_q \cdot \ln Q_it + c_g \cdot \ln G_it + c_p \cdot \ln p_it + \mu_it$$

(Eq. 7)

where C_it is the total variable transport sector cost; w_it is the input price vector; Q_it is the volume of cargo transported; G_it is the highway infrastructure inventory; and p_it is the relevant price level. A $c_g < 0$ coefficient indicates that better infrastructure conditions lower variable costs for this sector.

6.6. Databases available for Brazil

Table 6 – Recommended Databases for Empirical Estimation of the Proposed Agenda

Variable	Source	Coverage	Remarks
State GDP (Y_it)	IBGE/SCN Regional	1985 – present	State deflators: regional IPCA/IGP-M
Federal investments in transport	Transparency Portal/ SIAFI	2000 – present	Commitment, settlement, and payment by state
Public capital inventory (highways)	DNIT (paved. ext. by state)	1980 – present	PIM with depreciation to be estimated
Highway Quality (ICM/ DNIT)	DNIT	2012 – present	Monthly index by state
Human capital (H_it)	PNAD/PNADC/MTE-RAIS	1992 – present	Middle years of study, formal AEP
Rainfall (instrument)	INMET / ANA / ERA5-ECMWF	1950 – present	Weather stations; Reanalysis
State spending on transport	FINBRA/STN	1989 – present	Pre-2000 consistency limitations
Logistic cost index	ILOS (annual)	2004 – present	Components by mode and activity
State exports (opening)	AliceWeb / MDIC	1989 – present	FOB by state of origin

Source: prepared by the authors.

7. ECONOMIC POLICY IMPLICATIONS

The consolidated findings in the literature, together with the fiscal evidence documented in this paper, and with the historical analysis of the FRN, point to measurable economic policy implications. This section presents four quantitative dimensions: the inventory holding gap, the cumulative costs of the 1988 disruption, the marginal return exercise, and the catch-up scenarios.

First: the inventory maintenance gap. The current level of federal public investment in transport (0.13% of GDP) is not enough to stabilise the capital inventory, which would require at least 1.96% of GDP a year to cover just depreciation and demand growth (Frischtak and Mourão, 2017). The gap between the current level and the inventory preservation threshold is approximately 1.83 percentage points of GDP each year. Using the 2025 GDP (BRL 12.7 trillion), this is equivalent to an annual financing shortfall of around BRL 232 billion, funds that are not invested and whose cumulative effects appear as a net deterioration of the physical inventory, expressed in the rising percentage of highways in poor or very poor condition, together with increasing numbers of projects halted by insufficient cash flows.

Second: the accumulated costs of the 1988 disruption. During the 36 years (1989 – 2025) under the post-FRN budget discretion regime, average annual investments in transport hovered around 0.30% of GDP, compared to a historical average of 1.50% between 1945 and 1980. The average differential of 1.20 p.p. of GDP p.a., accumulated for three and a half decades, forms a massive chunk of funding that is no longer allocated to infrastructure. Applying this differential to the average

GDP for the period (conservatively estimated at BRL 5 trillion in 2025 values), the accumulated amount not invested since the 1988 disruption exceeds BRL 2.2 trillion in constant terms. This figure contextualises why the current transport infrastructure inventory falls so far short of what is needed by an economy of the size and complexity of Brazil.

Third: marginal returns and catch-up exercises. Under the hypothesis that γ is around 0.10, an estimate drawn up by Calderón et al. (2015) for developing countries, and using Brazil's 2025 GDP of about BRL 12.7 trillion, an increase of 1 percentage point of GDP in public capital inventory in transport. This implies that additional investments of around BRL 127 billion disbursed over four to five years would generate a permanent increase of approximately 0.10% in the GDP level, equivalent to an additional BRL 12.7 billion per year in the steady-state product. With the higher elasticity estimated by Ferreira (1996) for Brazil ($\gamma \approx 0.70$), the same increase in inventory would generate a permanent gain of 0.70% of GDP, or BRL 88.9 billion a year. However, this top estimate should be viewed with caution, due to the data context and period to which it refers. The plausible range of permanent annual return for BRL 127 billion of additional investment thus falls between BRL 12.7 billion (worst case scenario, $\gamma = 0.10$) and BRL 88.9 billion (best case scenario, $\gamma = 0.70$), with a central value of around BRL 25 to 30 billion ($\gamma \approx 0.20$ that is compatible with Bom and Ligthart, 2008).

Under the hypothesis that γ is around 0.10 (consolidated estimate by Calderón et al., 2015, for developing countries) and using Brazil's 2025 GDP (about BRL 12.7 trillion), an increase of 1 percentage point of GDP in public capital inventory allocated to transport would drive a permanent increase of approximately 0.10% in GDP level, equivalent to an additional BRL 12.7 billion a year in the steady-state product. Although this is an order-of-magnitude calculation that is subject to all the qualifications in the literature, it nevertheless shows that returns are significant and persistent.

Fourth: catch-up scenarios and intermodal allocations. The OECD estimates that Brazil would need 3.7% of its GDP each year until 2030 to eliminate accumulated infrastructure shortfalls, indicating additional investments for five consecutive years of around 3.57 p.p. of GDP above the current level (0.13%), or about BRL 453 billion a year in 2025 values. A scenario of more gradual convergence on the inventory preservation threshold (1.96% of GDP), would require an additional 1.83 p.p. of GDP each year, equivalent to BRL 232 billion per year above the current level, also for long enough to halt deterioration. A third scenario based on intermediate efforts (with investments of 1.0% of GDP each year, for an additional BRL 127 billion) would not eliminate the accumulated shortfall. However, this would stabilise its growth and, at $\gamma = 0.10$, would produce a permanent annual return of BRL 12.7 billion in product. These three scenarios are summarised in Table 7. Regarding intermodal allocations, it is worth noting that, under the elasticities consolidated in the literature (γ between 0.07 and 0.17) and using the cost differential between modes, the marginal economic return of one *real* invested in railways and waterways is substantially higher than that of an additional *real* allocated to existing highways, especially for regions (like the North, the Midwest, and part of the Northeast) with more intensive commodity transport activities over long distances. Allocating only 2.26% to the rail sector, current budget allocations do not reflect this differential, constituting a source of allocative inefficiency, regardless of total investment volumes.

Table 7 – Transport Infrastructure Investment Scenarios and Estimated Returns

Scenario	Additional	Minimum horizon	Permanent annual return (γ = 0.10)	Observação
Inventory Maintenance	+1.83 p.p. GDP (~BRL 232 billion)	Ongoing	~BRL 23.2 billion/ year	Halts deterioration, but fails to catch up on accumulated post-1988 shortfalls
Intermediate effort	+0.87 p.p. GDP (~BRL 127 billion)	4 to 5 years	~BRL 12.7 billion/ year	Stabilises shortfall expansion, with significant permanent returns
Fast-tracked catch-up (OECD)	+3.57 p.p. GDP (~BRL 453 billion)	5 years	~BRL 45.3 billion/ year	Eliminates accumulated shortfalls, but requires tax framework review
Current scenario (2025)	0.13% GDP (~BRL 16.5 billion)	–	Negative (deterioration)	Inventory deteriorates ~1.83 p.p. GDP/year, below replacement threshold

Prepared by the authors. Returns calculated with γ = 0.10 (Calderón et al., 2015) over the GDP of BRL 12.7 trillion (2025). Inventory maintenance scenario: Frischtak and Mourão threshold (2017). Fast-tracked catch-up: OECD (2023).

8. CONCLUSION

This paper documents, systematises and analyses the chronic underinvestment in transport infrastructure in Brazil from four complementary angles: the historical disruption of the financing model with the elimination of the FRN in 1988, the contemporary fiscal track-record of the DNIT, aggregate macroeconomic costs measured by logistics indicators and the econometric literature on the causal relationships between public capital and product.

The elimination of the FRN by Brazil's 1988 Constitution is one of the most underestimated milestones in the history of infrastructure investment in Brazil. Justified by the need for fiscal flexibility and the disruption from practices pursued by the previous administration, the ban on tied tax revenues eliminated the only mechanism that had supported decades of steady highway network expansion. The pattern established since then is exactly what the 2026 data continue to document: ongoing dependence on disputed annual allocations in general budgets, subjection to discretionary contingencies and blocks, and investment treatment as a carryover variable.

The proposed econometric agenda, which includes panel production functions with the GMM System and PMG, IR strategies via rainfall, SAR/SEM/SDM spatial models, and dual-cost functions, suggests a way to more accurately estimate the economic costs of Brazil's infrastructure shortfall. The production of robust econometric evidence on this topic has not only academic but also political and institutional value: in budget discussions where infrastructure investment competes with consumer spending, having accredited estimates of marginal returns on public capital is a crucial input for technical presentations.

BIBLIOGRAPHY

ANPAD. Fundo Rodoviário Nacional e o financiamento da infraestrutura rodoviária federal brasileira: trajetória e ruptura institucional. In: ENCONTRO DA ANPAD, 30., 2006, Salvador. Anais... Rio de Janeiro: ANPAD, 2006.

ANSELIN, L. Spatial Econometrics: Methods and Models. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1988.

ARELLANO, M.; BOND, S. Some tests of specification for panel data: Monte Carlo evidence and an application to employment equations. Review of Economic Studies, v. 58, n. 2, p. 277-297, 1991.

ASCHAUER, D. A. Is public expenditure productive? Journal of Monetary Economics, v. 23, n. 2, p. 177-200, 1989.

BARRO, R. J. Government spending in a simple model of endogeneous growth. Journal of Political Economy, v. 98, n. 5, p. 103-125, 1990.

BERTUSSI, G. L.; ELLERY JUNIOR, R. Infraestrutura de transporte e crescimento econômico no Brasil. Journal of Transport Literature, v. 6, n. 4, p. 101-132, 2012.

BLUNDELL, R.; BOND, S. Initial conditions and moment restrictions in dynamic panel data models. Journal of Econometrics, v. 87, n. 1, p. 115-143, 1998.

BOM, P. R. D.; LIGTHART, J. E. How productive is public capital? A meta-analysis. CESIfo Working Paper, n. 2206, 2008.

BURKE, P. J.; STERN, D. I.; BRUNS, S. B. The impact of electricity on economic development: A macroeconomic perspective. International Review of Environmental and Resource Economics, v. 12, n. 1, p. 85-127, 2018.

CALDERÓN, C.; SERVÉN, L. The effects of infrastructure development on growth and income distribution. World Bank Policy Research Working Paper, n. 3400, 2004.

CALDERÓN, C.; MORAL-BENITO, E.; SERVÉN, L. Is infrastructure capital productive? A dynamic heterogeneous approach. Journal of Applied Econometrics, v. 30, n. 2, p. 177-198, 2015.

CNI – CONFEDERAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA. Relatório Mensal de Infraestrutura – February 2026. Brasília: CNI, 2026.

CNI; PNL – CONFEDERAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA; PLANO NACIONAL DE LOGÍSTICA. Matriz de transportes e logística no Brasil 2025. Brasília: CNI, 2025.

CNT – CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE. Boletim de Conjuntura Econômica. Brasília: CNT, February 2026.

CONJUR. Usuário de estradas paga imposto direto e indireto. Consultor Jurídico, 27 abr. 2004. Available at: https://www.conjur.com.br. Accessed in: March 2026.

FERREIRA, P. C. Investimento em infraestrutura no Brasil: fatos estilizados e relações de longo prazo. Pesquisa e Planejamento Econômico, v. 26, n. 2, p. 231-252, 1996.

FERREIRA, P. C.; MALLIAGROS, T. G. Impactos produtivos da infraestrutura no Brasil: 1950-1995. Pesquisa e Planejamento Econômico, v. 28, n. 2, p. 315-338, 1998.

FRISCHTAK, C.; MOURÃO, J. Uma estimativa do estoque de capital de infraestrutura no Brasil. In: DE NEGRI, J. A.; ARAÚJO, B. C. (Org.). Tecnologia, exportação e emprego.

Brasília: IPEA, 2017.

GRAMLICH, E. Infrastructure investment: A review essay. Journal of Economic Literature, v. 32, n. 3, p. 1176-1196, 1994.

HANSEN, L. P. Large sample properties of generalized method of moments estimators. Econometrica, v. 50, n. 4, p. 1029-1054, 1982.

HOLTZ-EAKIN, D. Public-sector capital and the productivity puzzle. Review of Economics and Statistics, v. 76, n. 1, p. 12-21, 1994.

ILOS – INSTITUTO DE LOGÍSTICA E SUPPLY CHAIN. Custos logísticos no Brasil 2025. Rio de Janeiro: ILOS, 2025.

IPEA – INSTITUTO DE PESQUISA ECONÔMICA APLICADA. Infraestrutura no Brasil: contexto histórico e principais desafios. Brasília: IPEA, 2022. (Capítulo 1 – Série Infraestrutura).

LESAGE, J.; PACE, R. K. Introduction to Spatial Econometrics. Boca Raton: CRC Press, 2009.

LYNDE, C.; RICHMOND, J. Public capital and total factor productivity. International Economic Review, v. 34, n. 2, p. 401-414, 1993.

MOREIRA, R. B. O Fundo Rodoviário Nacional. Rio de Janeiro: IPEA, 1969.

MUNNELL, A. H. Why has productivity growth declined? Productivity and public investment. New England Economic Review, Jan/Feb 1990, p. 3-22, 1990.

OCDE – ORGANIZAÇÃO PARA A COOPERAÇÃO E DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO. Infrastructure Investment and Growth: Brazil in International Context. Paris: OECD, 2023.

PESARAN, M. H.; SHIN, Y.; SMITH, R. Pooled mean group estimation of dynamic heterogeneous panels. Journal of the American Statistical Association, v. 94, n. 446, p. 621-634, 1999.

REVISTA DO DIREITO PÚBLICO. Uma análise sobre o financiamento da infraestrutura rodoviária por meio da utilização de parcerias público-privadas. Revista do Direito Público, Londrina, v. 11, n. 3, p. 150-188, December 2016.

RIBEIRO, M. R. P.; SANTOS, L. M. S. Investimento em infraestrutura de transportes e crescimento econômico: uma análise espacial dos estados brasileiros. Revista Brasileira de Estudos Regionais e Urbanos, v. 17, n. 1, p. 1-35, 2023.

ROCHA, F.; GIUBERTI, A. C. Composição do gasto público e crescimento econômico: uma avaliação macroeconômica da qualidade dos gastos dos estados brasileiros. Economia Aplicada, v. 11, n. 4, p. 463-485, 2007.

ROMP, W.; DE HAAN, J. Public capital and economic growth: A critical survey. Perspektiven der Wirtschaftspolitik, v. 8, n. S1, p. 6-52, 2007.

SILVA, M. V. B. da; MARTINS, G. A.; NEDER, H. D. Investimentos em infraestrutura de transportes e desigualdades regionais no Brasil: uma análise dos impactos do PAC. Revista de Economia Política, v. 36, n. 4, p. 840-866, 2016.

STRAUB, S. Infrastructure and development: A critical appraisal of the macro-level literature. World Bank Policy Research Working Paper, n. 4590, 2008.

ARTIGO 5

AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA TÉCNICA DE TERMINAIS HIDROVIÁRIOS USANDO FRONTEIRAS ESTOCÁSTICAS: UMA APLICAÇÃO EM TERMINAIS HIDROVIÁRIOS NA REGIÃO DO BAIXA AMAZONAS NO PARÁ

Paulo Victor Souza Viégas (UFPA), Carolina Costa Ramos (UFPA) e Valcir João da Cunha Farias (UFPA)

RESUMO

Este estudo avalia a eficiência técnica de terminais hidroviários do Baixo Amazonas, Pará, utilizando a Análise de Fronteira Estocástica (SFA). A metodologia, aplicada a dez terminais, considerou variáveis como movimento de passageiros, número de viagens, comprimento do cais de atracação e área terminal. A função de produção Cobb-Douglas permitiu estimar os níveis de eficiência, capturando tanto a ineficiência técnica quanto a variabilidade externa. O terminal de Monte Alegre obteve a maior eficiência (97,11%), equilibrando frequência de viagens e infraestrutura. Em contraste, Óbidos registrou a menor (78,67%), indicando subutilização de recursos. A comparação com a Análise por Envoltória de Dados (DEA) revelou diferenças metodológicas significativas, como a atribuição pela SFA de eficiências maiores a terminais impactados por variáveis aleatórias, exemplificada pelo caso de Alenquer (+33,02%). A SFA mostrou-se uma ferramenta valiosa para o planejamento portuário regional.

Palavras-chave: Fronteira Estocástica, Eficiência Técnica, Terminais Hidroviários.

ABSTRACT

Este estudo avalia a eficiência técnica dos terminais hidroviários na região do Baixo Amazonas, no Brasil, utilizando a Análise de Fronteira Estocástica (SFA). Os dados operacionais — incluindo movimento de passageiros, número de viagens, comprimento de cais de atracação e área do terminal — de dez terminais foram analisados com a função de produção Cobb-Douglas. O modelo SFA capturou a ineficiência técnica e a variabilidade externa de maneira eficaz. Os resultados mostraram que o terminal Monte Alegre obteve a maior eficiência (97,11%) ao equilibrar a frequência das viagens e a infraestrutura. Por outro lado, Óbidos teve a menor eficiência (78,67%), provavelmente devido à subutilização de recursos. Uma comparação com a Análise Envoltória de Dados (DEA) revelou importantes diferenças metodológicas; A SFA atribuiu eficiências maiores aos terminais afetados por variáveis externas aleatórias, como visto no terminal de Alenquer (+33,02%). O estudo confirma que a SFA é uma ferramenta valiosa para a gestão e planejamento portuário..

Keywords: Fronteira Estocástica, Eficiência Técnica, Terminais Fluviais.

1. INTRODUÇÃO

O transporte hidroviário no Brasil é um componente fundamental da logística do país, especialmente devido ao menor custo e à extensa rede de rios e rotas costeiras. O país possui um vasto sistema de vias hidroviárias, compreendendo aproximadamente 63.000 quilômetros (km) de rios navegáveis, dos quais cerca de 19.000 km são usados para navegação interior (CNT, 2019). Essa infraestrutura aquaviária facilita o transporte de carga e de passageiros, desempenhando um papel fundamental na exportação de *commodities* como soja, minério de ferro e produtos agroindustriais.

Segundo Pereira (2021), os portos servem como elos críticos nas cadeias logísticas, possibilitando diversas atividades operacionais. No primeiro semestre de 2024, o fluxo nos portos brasileiros atingiu aproximadamente 646 milhões de toneladas (ANTAQ, 2024). Na região amazônica, o transporte hidroviário ganha ainda mais importância devido à sua densa rede fluvial, que frequentemente serve como a principal rota de transporte para áreas remotas.

A região do Baixa Amazonas desempenha um papel crucial no transporte hidroviário no Brasil, sendo responsável pela saída de grandes volumes de produtos agrícolas e minerais, assim como pelo transporte de passageiros nas comunidades ribeirinhas. No entanto, os terminais hidroviários enfrentam desafios como infraestrutura limitada e a necessidade de melhorar a eficiência operacional. Nesse contexto, é essencial analisar sua eficiência técnica para entender o desempenho operacional e propor soluções que contribuam para a otimização do setor.

A eficiência operacional é um fator crítico de sucesso para terminais portuários, especialmente no contexto global onde a competitividade e a demanda por serviços logísticos eficientes estão em constante crescimento. Segundo Lovell (1993), medir a eficiência técnica oferece uma oportunidade para investigar fontes de ineficiência e explorar fatores que contribuem para um forte desempenho operacional. Assim, analisar características como o número de viagens realizadas e a área disponível aos passageiros oferece percepções valiosos sobre os aspectos que mais impactam a produtividade do terminal.

A avaliação da eficiência técnica dos terminais hidroviários de Alenquer, Almeirim, Curuá, Faro, Monte Alegre, Óbidos, Prainha, Santana do Tapará, Santarém e Terra Santa, utilizando a Análise de Fronteira Estocástica (SFA), permite identificar gargalos operacionais e otimizar recursos físicos e logísticos essenciais para atender à crescente demanda por transporte fluvial na região amazônica. Este estudo examina quatro variáveis operacionais críticas — número de viagens, comprimento do cais de atracação, área do terminal e movimento de passageiros — selecionadas por sua representatividade na relação entrada-saída dos terminais do Baixo Amazonas. Esses indicadores, coletados de dez unidades, fornecem uma base empírica robusta para apoiar políticas públicas focadas na eficiência portuária, enfrentando os desafios logísticos e socioeconômicos da região.

Este estudo avalia a eficiência técnica de dez terminais hidroviários na região do Baixo Amazonas, utilizando a Análise de Fronteira Estocástica (SFA), com três objetivos principais: (1) medir níveis individuais de eficiência, identificar os terminais de melhor desempenho e suas características operacionais; (2) analisar o impacto de variáveis como frequência de

viagem e área do terminal nos resultados; e (3) comparar os achados com o modelo DEA para discutir como a incorporação de fatores estocásticos pela SFA muda a interpretação da eficiência. Os resultados revelam principalmente que terminais com maior frequência de viagem (X_1) tendem a ser mais eficientes, enquanto a comparação com o DEA demonstra que esta última superestima a ineficiência em unidades sujeitas a variabilidade externa.

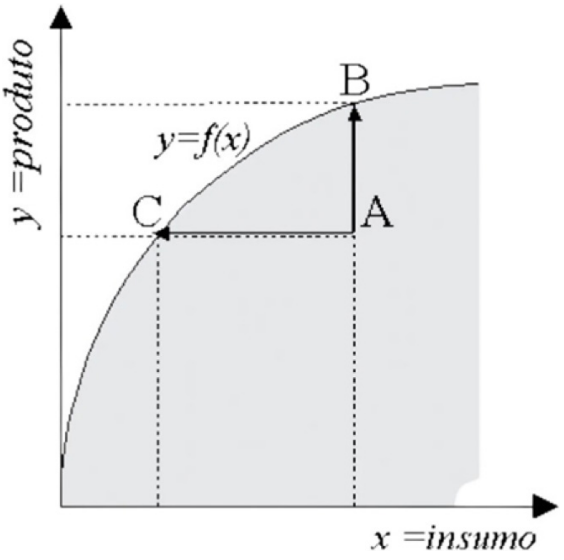
2. ESTRUTURA TEÓRICA

2.1 Técnicas de Análise de Eficiência

A análise de eficiência serve como uma ferramenta fundamental para avaliar o desempenho das unidades de produção, incluindo terminais portuários, que desempenham um papel crítico na logística nacional e global. A eficiência técnica avalia especificamente como os recursos disponíveis são utilizados para maximizar a produção, seja no manuseio de cargas ou na prestação de serviços. No setor portuário, tais análises se mostram particularmente valiosas devido ao impacto direto da eficiência tanto na competitividade operacional quanto nos custos logísticos. Dentro desse estrutura, as técnicas de análise de eficiência tornam-se essenciais, permitindo a avaliação do desempenho de diferentes unidades de produção e a identificação de oportunidades de melhoria (Zhang, 2024).

Como demonstrado por Krljan (2021), o conjunto de possibilidades de produção (PPS) constitui um conceito central na análise de eficiência. Esse conjunto representa todas as combinações possíveis de entradas (número de viagens, área do terminal) capazes de gerar um determinado nível de saída (taxa de passageiro), conforme ilustrado na Figura 1. A fronteira eficiente forma o limite externo do PPS, representando as práticas ideais de produção. Essa fronteira pode ser estimada através de vários métodos, dependendo das técnicas analíticas e modelos empregados. As unidades de produção que operam nessa fronteira são consideradas eficientes, enquanto as abaixo dela apresentam diferentes graus de ineficiência (Pessanha & Souza, 2003).

Figura 1 - Conjunto de Possibilidades de Produção (PPS)



Fonte: Pessanha e Souza (2003).

A fronteira de produção serve como uma estrutura de referência que permite a comparação de desempenho entre diferentes Unidades Tomadoras de Decisão (DMUs) – neste estudo, os terminais hidroviários dentro do mesmo setor. Essa comparação direta de fronteira permite a classificação dos produtores em dois grupos distintos: aqueles que operam com eficiência total e aqueles que demonstram ineficiência mensurável (López-Bermúdez *et al*., 2019).

A métrica radial de Debreu estabelece que o grau de eficiência relativa de um produtor pode ser quantificado pela distância vertical entre seu ponto operacional e a fronteira de produção (Kumbhakar & Lovell, 2003). Essa abordagem revela um processo produtivo abaixo do ideal por meio de desvios medidos da função fronteira. De acordo com essa medição radial, a eficiência técnica de um produtor orientado à produção é expressa por:

$$TE_i = \frac{y_i}{f(x_i)} \quad (1)$$

Onde $f(\boldsymbol{xi})$ representa a produção máxima viável, determinada pela função da fronteira de produção, e $\boldsymbol{yi}$ denota a produção observada de fato. Ao reordenar os termos e aplicando uma transformação logarítmica, obtemos:

$$\ln y_i = \ln f(x_i, \beta) - u_i \quad (2)$$

Onde:

$\boldsymbol{ui} = -\ln \boldsymbol{TEi} \geq \boldsymbol{0}$: mede a ineficiência técnica (não negativa por definição);

$\boldsymbol{f(xi, \beta)}$: representa a fronteira de produção determinística;

$\boldsymbol{\beta}$: denota o vetor dos parâmetros da função de produção a serem estimados.

Assim, a eficiência técnica do produtor i-th é dada por:

$$TE_i = e^{-ui} \quad (3)$$

Os modelos empregados para análise de eficiência podem ser classificados em duas categorias principais: determinística e estocástica. Modelos determinísticos operam sob a suposição de que toda ineficiência observada é atribuível exclusivamente às unidades de produção, sem considerar possíveis variações aleatórias. Um exemplo clássico de abordagem determinística é a Análise Envoltória de Dados (DEA), uma das técnicas amplamente utilizadas para avaliar a eficiência dos terminais portuários (Costa, 2020). Como um método não paramétrico, a DEA emprega programação linear para construir uma fronteira de eficiência ao comparar unidades de produção entre si. A principal limitação da DEA está em sua incapacidade de diferenciar entre ineficiência genuína e ruído aleatório; consequentemente, qualquer desvio da fronteira é interpretado como ineficiência técnica.

Em contraste, os modelos estocásticos levam em conta explicitamente as variações de produção que podem surgir de fatores fora do controle da unidade de produção, incluindo flutuações de mercado, condições climáticas e outros elementos imprevisíveis. Uma técnica estocástica proeminente é a Análise de Fronteira Estocástica (SFA). Como método paramétrico, a SFA modela a produção de uma unidade produtora composta por dois componentes distintos: (1) um termo de erro aleatório que captura variabilidade imprevisível, e (2) um componente de ineficiência técnica. Essa abordagem se mostra particularmente valiosa em ambientes operacionais sujeitos a grande aleatoriedade externa – como terminais portuários, onde as demandas de carga e serviço de passageiros podem apresentar variabilidade temporal substancial.

A região do Baixo Amazonas exemplifica a importância desse avanço metodológico, apresentando desafios operacionais exclusivos, incluindo variações sazonais pronunciadas no nível da água e infraestrutura restrita. Esses fatores contextuais tornam a SFA particularmente valiosa, pois sua estrutura incorpora explicitamente tais variáveis ambientais, produzindo resultados que representam de forma mais fiel as condições operacionais locais.

A Análise de Fronteira Estocástica (SFA) é uma abordagem econométrica paramétrica que modela simultaneamente a ineficiência técnica e choques externos aleatórios, tornando-se particularmente adequada a ambientes com variabilidade significativa e incontrolável — como o contexto das vias fluviais amazônicas, analisadas neste estudo.

Essa metodologia se distingue por modelar explicitamente tanto a ineficiência quanto os choques aleatórios, tornando-se uma poderosa ferramenta analítica para avaliação de eficiência em terminais portuários e vários outros setores (Kumbhakar & Lovell, 2003). Modelos tradicionais de regressão linear estimam uma função média que descreve a relação central de tendência entre insumos e produção, sem distinguir variabilidade aleatória da ineficiência técnica. Em contraste, a SFA estende essa estrutura estimando uma função envoltória que representa o nível máximo viável de produção (sob orientação de saída) para um dado conjunto de entradas. Essa abordagem avançada incorpora tanto componentes de ineficiência técnica quanto ruído estocástico. A distância vertical entre o desempenho observado de uma unidade de produção e essa fronteira quantifica seu nível de ineficiência (Pessanha & Souza, 2003).

O modelo SFA é formalmente expresso da seguinte forma:

$$y_i = TE_i \cdot f(x_i, \beta)e^{vi} \quad (4)$$

Visto que $TEi = e{-}ui$, a equação pode ser reformulada da seguinte forma:

$$y_i = f(x_i, \beta)e^{vi-ui} \quad (5)$$

Onde:

$f(xi, \beta)evi$: Fronteira de produção estocástica

yi: Produção escalar

xi : Vetor de entrada

vi : Termo de erro aleatório (distribuído simetricamente)

ui: Termo de ineficiência técnica (não negativo)

β : Vetor de parâmetros tecnológicos

A estrutura da Análise de Fronteira Estocástica (SFA) compreende, consequentemente, dois componentes distintos: um determinístico e outro estocástico. O componente determinístico é representado por uma função de produção ou função de custo (este estudo emprega uma especificação da função de produção), que caracteriza a relação sistemática entre fatores de entrada (insumos) e outputs de produção.

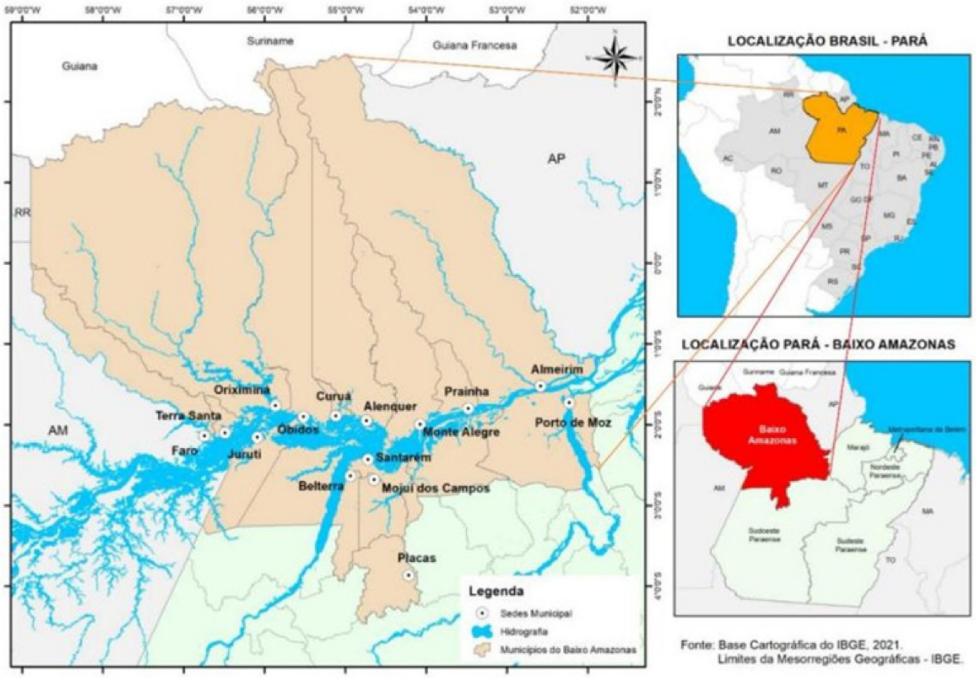
3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Área de Estudo

A região do Baixo Amazonas (Figura 2), localizada no estado do Pará, Brasil, é estrategicamente vital para o transporte hidroviário nacional e internacional. Caracterizada por uma extensa rede fluvial — incluindo os rios Amazonas, Tapajós e Xingu — a área conecta diretamente as zonas de produção amazônicas ao Oceano Atlântico. Essa posição geográfica privilegiada facilita a exportação de *commodities* como grãos e minerais, desempenhando um papel fundamental na distribuição de produtos agrícolas e na logística de cargas e passageiros**.**

Os terminais hidroviários desta região – incluindo os de Alenquer, Almeirim, Curuá, Faro, Monte Alegre, Óbidos, Prainha, Santana do Tapará, Santarém e Terra Santa – desempenham um papel fundamental na economia local ao facilitar o acesso ao mercado e promover a mobilidade populacional. O transporte fluvial serve como a principal conexão para muitas comunidades à beira do rio, que dependem dessas rotas para acesso a bens e serviços essenciais, bem como para transporte de cargas e passageiros. Em termos de infraestrutura, os terminais enfrentam desafios significativos, especialmente na manutenção de instalações adequadas e seguras. Este estudo analisou as eficiências operacionais de dez terminais hidroviários na Região de Integração do Baixo Amazonas (Tabela 1).

Figura 2 - Área de Estudo



Fonte: PINNA (2024).

Tabela 1. Terminais Hidroviários Avaliados

ID	Município	Terminais
1	Santarém	Terminal Hidroviário de Santarém
2	Óbidos	Terminal Hidroviário de Óbidos
3	Faro	Terminal Hidroviário de Faro
4	Monte Alegre	Terminal Hidroviário de Monte Alegre
5	Curuá	Terminal Hidroviário de Curuá
6	Alenquer	Terminal Hidroviário de Alenquer
7	Almeirim	Terminal Hidroviário de Almeirim
8	Prainha	Terminal Hidroviário de Prainha
9	Terra Santa	Terminal Hidroviário de Terra Santa
10	Santarém	Terminal Hidroviário de Santana do Tapará

Fonte: Autores (2025).

3.2 Aquisição de Dados

O banco de dados utilizado (Tabela 2), do tipo de seção transversal, foi obtido a partir do estudo de Pina (2024) e Farias (2025), que empregaram a metodologia DEA usando o modelo CCR. As unidades de medida podem ser visualizadas na Tabela 3. Os dados selecionados, utilizados no estudo de referência (Pina, 2024; Farias, 2025), mostrou-se relevante para avaliar a eficiência técnica dos terminais hidroviários na região do Baixo Amazonas, pois eles representam os principais aspectos operacionais dos terminais, incluindo tráfego de passageiros, número de viagens, comprimento do cais de atracação e área do terminal de passageiros.

Tabela 2. Dados usados no modelo

Terminal Hidroviário	Tráfego de Passageiros (Saída)	Número de Viagens (Entrada)	Comprimento do Cais de Atracação (Entrada)	Área do Terminal de Passageiros (Entrada)
Alenquer	4800	120	15	770
Almeirim	5400	180	15	387
Curuá	2700	90	25	266,8
Faro	2250	90	15	266,8
Monte Alegre	4800	120	15	450
Óbidos	3600	120	25	595
Prainha	3600	120	15	305
Santana do Tapará	4500	150	15	266,8
Santarém	31116	420	200	3600
Terra Santa	4500	150	15	266,8

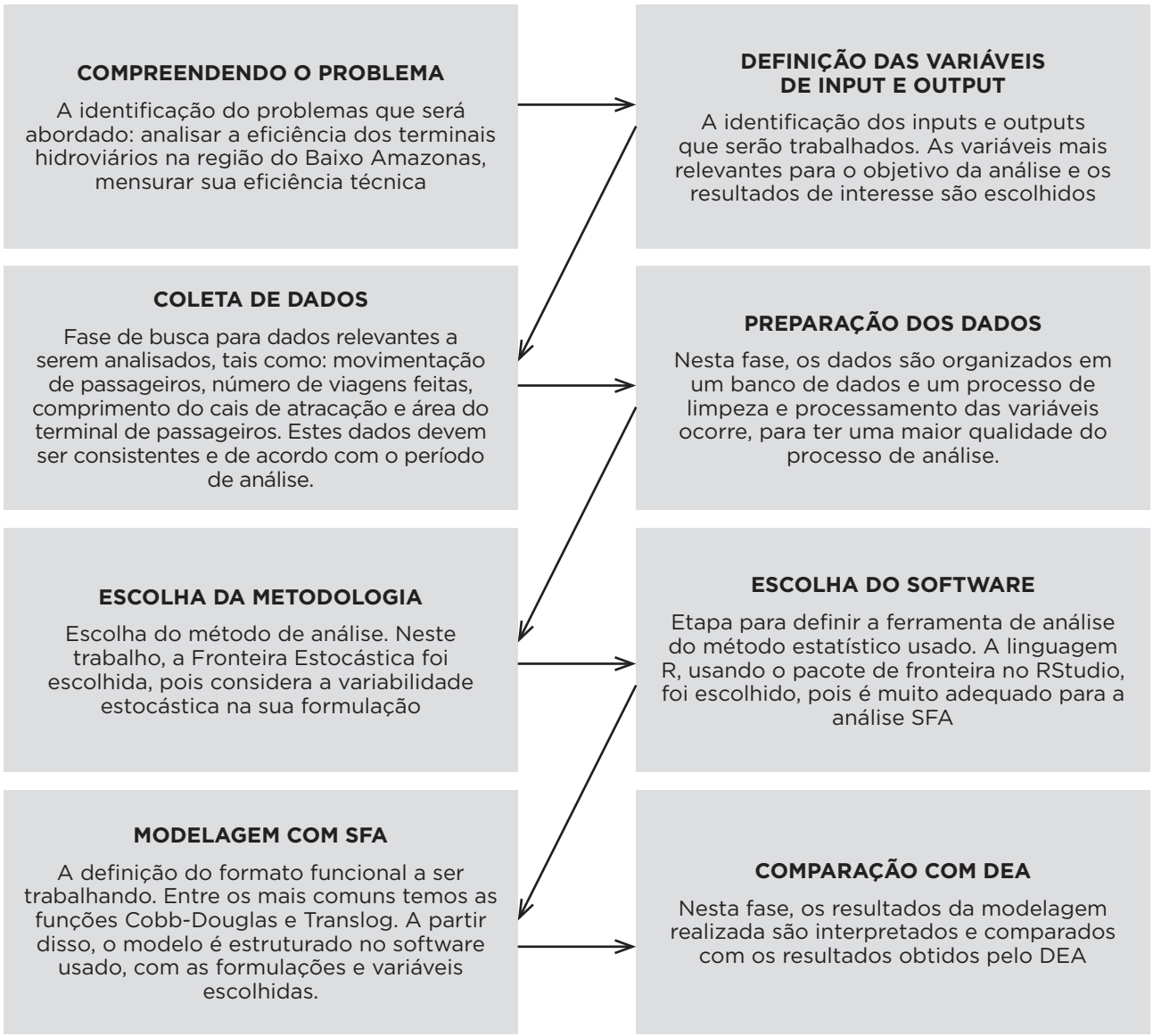
Fonte: Adaptado de Pina (2024)

Embora o conjunto de dados permaneça inalterado, a seleção da SFA permite capturar a influência dos efeitos aleatórios, gerando novas perspectivas sobre a eficiência técnica dos terminais. Portanto, este estudo complementa a pesquisa de referência ao introduzir uma metodologia mais robusta para levar em conta variações externas. O uso de dados idênticos reforça a validade e comparabilidade das análises, contribuindo para uma avaliação mais abrangente da eficiência técnica entre terminais hidroviários na região do Baixo Amazonas do Pará.

3.3 Processamento de Dados

O fluxograma (Figura 3) descreve as etapas seguidas na análise de eficiência deste estudo. O problema da pesquisa foi inicialmente definido, estabelecendo um foco na avaliação da eficiência técnica dos terminais hidroviários na região do Baixo Amazonas.

Figura 3 – Fluxograma de Modelagem SFA



Fonte: Autores (2025).

Posteriormente, variáveis de entrada e saída foram definidas com base em dados de Pina (2024) e Farias (2025). Após a coleta, os dados foram processados no Excel, e a modelagem SFA foi feita usando RStudio com o pacote *frontier*, adotando uma função de produção Cobb-Douglas. Três variáveis de entrada e uma variável de saída foram incorporadas, conforme detalhado na Tabela 2.

Os resultados da modelagem foram então analisados, destacando aspectos como dispersão de dados e a eficiência de cada terminal. Foi feita uma comparação com os resultados do estudo DEA de Pina (2024) e Farias (2025), permitindo identificar diferenças metodológicas e os insights específicos fornecidos por cada abordagem.

Como estabelecido anteriormente, a estrutura do modelo SFA baseava-se na função de produção Cobb-Douglas, que foi linearizada para a aplicação com estimativa de máxima probabilidade – essencial para a estimativa de parâmetros em contextos de dados de corte transversal. Esse modelo emprega três entradas e uma saída, representando uma relação simplificada entre a alocação de recursos do terminal e o produção operacional. A seleção dessa função de produção é justificada por sua adequação para modelar processos de produção com elasticidade constante de substituição entre os fatores. A formulação matemática do modelo linearizado SFA foi estruturada da seguinte forma:

Onde:

$\ln yi$: Variável dependente (transformada logarítmicamente). Representa o logaritmo natural de produção (ou output) da unidade observada.

$\ln \beta_0$: Corresponde ao logaritmo do termo constante na equação, representando a produtividade média quando todas as entradas são zero (em termos logarítmicos). β_0 é a constante da função de produção.

$\beta_j \ln x_{ji}$: Coeficientes de variáveis independentes (elasticidades). Cada βj mede a elasticidade da produção em relação à entrada x_j. Os termos x_{ji} representam os insumos de produção (recursos) transformados logaritmicamente.

□□: Ruído estocástico (erro aleatório). Captura choques externos incontroláveis.

− □□: Ineficiência técnica. Representa a porção da produção abaixo da fronteira máxima (devido a ineficiências).

□ □ **= 1,2, ... ,10**: Indica que a equação se aplica a cada uma das 10 unidades observadas (por exemplo, 10 empresas, anos ou regiões).

$$\ln y_i = \ln \beta_0 + \beta_1 \ln x_i + \cdots + \beta_n \ln x_n + \varepsilon_i$$

$$\ln y_i = \ln \beta_0 + \beta_1 \ln x_1 + \beta_2 \ln x_2 + \beta_3 \ln x_3 + v_i - u_i \qquad \forall\ i = 1,2, \ldots ,10.$$

4. RESULTADOS

4.1 Análise da Eficiência Técnica via SFA

A Tabela 3 revela disparidades significativas nas pontuações de eficiência dos terminais obtidas por meio da SFA. Monte Alegre (97,11%) e Santarém (93,34%) aparecem como as unidades mais eficientes, refletindo a forte relação entre a frequência das viagens (X_1 = 1,0708; $p < 0,001$) e a infraestrutura disponível (X_3 = 0,3168; p = 0,0015). Monte Alegre, por sua vez, opera com 120 viagens anuais em uma área de 450 m², sugerindo uma otimização logística. Em contraste, Óbidos (78,67%) apresenta a menor eficiência, provavelmente devido à subutilização de seu cais de atracação (X_2 = 0,0031; p = 0,971), onde seus 25 metros de comprimento não se traduzem em maior produtividade. Essas descobertas apoiam a premissa inicial de que fatores operacionais – além da mera infraestrutura – são determinantes críticos da eficiência na região.

Tabela 3 – Pontuações da Eficiência Estimada Usando DEA e SFA

Terminal Hidroviário	SFA	DEA	SFA - DEA
Alenquer	91,85%	58,82%	33,02%
Almeirim	85,79%	100%	-14,21%
Curuá	94,73%	79,58%	15,15%
Faro	84,77%	66,32%	18,45%
Monte Alegre	97,11%	100%	-2,89%
Óbidos	78,67%	62,39%	16,29%
Prainha	92,14%	87,26%	4,88%
Santana do Tapará	93,40%	100%	-6,60%
Santarém	93,34%	100%	-6,66%
Terra Santa	93,40%	88,24%	5,16%

Fonte: Autores (2025).

Os resultados da estimativa de máxima probabilidade (MLE) para a análise de eficiência técnica dos terminais hidroviários do Baixo Amazonas são apresentados na Tabela 4. No modelo de Análise de Fronteira Estocástica (SFA) com uma função de produção *Cobb-Douglas* linearizada, X_1, X_2 e X_3 representam os *inputs* usados para estimar a eficiência técnica dos terminais hidroviários. Essas variáveis são derivadas diretamente dos dados operacionais coletados (Tabela 2): X_1: Número de viagens; X_2: Comprimento do cais de atracação (em metros); X_3: Área do terminal de passageiros (em m²).

Tabela 4 – Estatísticas do Modelo SFA

Parâmetros	Valor estimado	Nível de importância
Intercepto	1,3302	0,0103
log(X1)	1,0708	1,73E-11
log(X2)	0,0031	Não é significativo
log(X3)	0,3168	0,0015
sigmaSq	0,0207	Não é significativo
Gama	0,7997	Não é significativo

Fonte: Autores (2025)

A análise revela um intercepto estimado de 1,3302 com erro padrão de 0,5182, mostrando significância estatística no nível de 5% (valor-p ≈ 0,01). Esse valor representa o ponto de partida da função de produção na escala logarítmica, indicando o nível esperado de saída quando as entradas são mantidas constantes.

A estimativa do coeficiente para $\log(X_1)$ (número de viagens) foi 1,0708, mostrando alta significância estatística (valor-p < 0,001). Isso sugere que, ceteris paribus, com um aumento de 1% no número de viagens leva a um aumento esperado de 1,07% no fluxo de passageiros. Esses resultados destacam o número de viagens como o nível de influência mais determinante entre as variáveis do modelo para os terminais analisados. O coeficiente estimado para $\log(X_2)$ (comprimento do cais de atracação) foi 0,0031, sem significado estatística (p-valor = 0,971). Isso sugere que, dentro do contexto do modelo, o comprimento do cais de atracação não influencia significativamente a produção e pode ser excluído de análises futuras ou testado em especificações funcionais alternativas.

Por outro lado, $\log(X_3)$ (área do terminal) mostrou um coeficiente de 0,3168, significativo no nível de 1% (p-valor = 0,001). Isso indica que um aumento de 1% na área do terminal está associado a um aumento esperado de 0,32% no fluxo de passageiros, demonstrando que a infraestrutura física desempenha um papel mensurável, embora relativamente modesto, na eficiência do terminal.

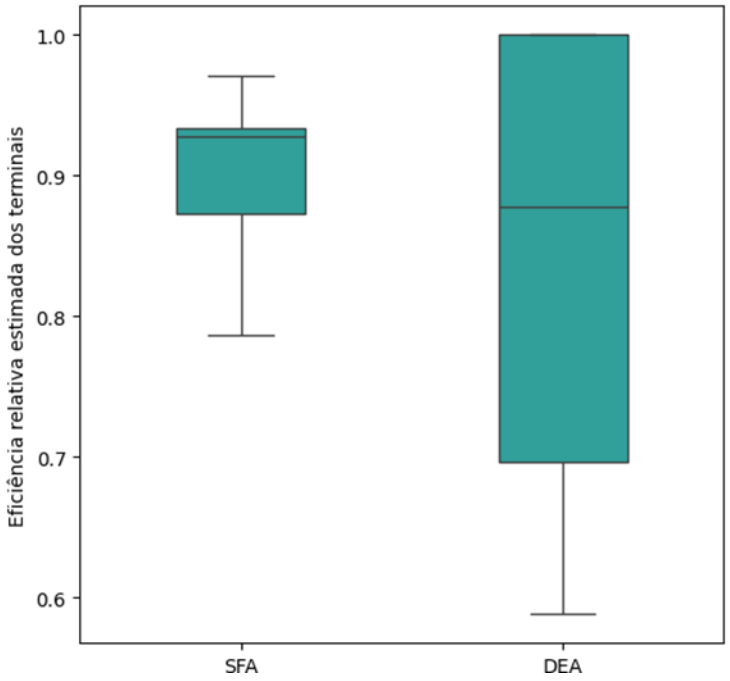
Além desses parâmetros, sigma-quadrado (σ^2) foi estimado em 0,0207 sem significância estatística (valor-p = 0,275), indicando baixa variabilidade geral dos dados, enquanto o gamma (γ) - medindo a proporção da variância total atribuída à ineficiência técnica - foi estimado em 0,7997, mas também não teve significância estatística (valor-p = 0,104). Isso sugere que o componente estocástico desempenha um papel substancial na variabilidade da saída, embora seja necessário ter um refinamento adicional para distinguir melhor entre ineficiência técnica e ruído aleatório. É importante reconhecer que a não significância de γ e σ^2 provavelmente se deve, ao menos em parte, ao tamanho reduzido da amostra (n = 10 DMUs), que restringe os graus de liberdade disponíveis para a estimativa de máxima probabilidade. Consequentemente, as pontuações individuais de eficiência relatadas aqui devem ser interpretadas como estimativas indicativas em vez de referências definitivas, e sua robustez se beneficiaria da validação com amostras maiores e especificações alternativas do modelo, como a função de produção Translog. No entanto, os resultados demonstram que a frequência da viagem (X_1) e a área terminal (X_3) são as variáveis mais significativas para a eficiência do terminal, enquanto o comprimento do cais de atracação (X_2) não mostrou relevância estatística — um achado que pode refletir a homogeneidade estrutural entre os terminais de pequeno porte da amostra, a maioria dos quais compartilha configurações de cais de atracação semelhantes.

4.2 Comparação entre SFA e DEA

A comparação com os resultados da DEA (Tabela 3) demonstra que a SFA atribui pontuações de eficiência mais altas a 60% dos terminais, particularmente Alenquer (+33,02%) e Faro (+18,45%). Essa divergência ocorre porque a SFA isola o impacto de variáveis aleatórias (por exemplo, variações sazonais do nível dos rios) ao incorporá-las no termo de erro (ν), enquanto a DEA interpreta tais variações como ineficiência técnica. Por outro lado, terminais como Almeirim (-14,21%) e Santarém (-6,66%) apresentaram máxima eficiência em DEA, mas não em SFA — indicando que seu desempenho pode ser superestimado quando a estocasticidade ambiental é desconsiderada. Essa distinção é particularmente importante no contexto

amazônico, onde o acentuado ciclo de enchentes e secas do Rio Amazonas — com amplitudes sazonais no nível da água que podem ultrapassar 10 metros — condiciona diretamente os horários de atracação, as margens de segurança da navegação e o agendamento das embarcações nos terminais ribeirinhos. A DEA, ao tratar todos os desvios de produção como ineficiência gerencial, confunde esses choques ambientais incontroláveis com falhas operacionais genuínas, superestimando assim a ineficiência para terminais mais expostos à variabilidade hidrológica. A estrutura da SFA, ao dividir explicitamente esses efeitos pelo termo de erro estocástico, fornece um quadro mais relevante para políticas: ele identifica onde a intervenção gerencial pode realisticamente melhorar o desempenho e onde a adaptação institucional à variabilidade climática é a resposta estratégica mais adequada. Do ponto de vista conceitual, os dois métodos respondem a questões diferentes — a DEA revela desempenho relativo sob um parâmetro determinístico, enquanto a SFA estima eficiência líquida de fatores ambientais incontroláveis — e seu uso combinado, conforme adotado neste estudo, fornece uma estrutura analítica mais rica do que qualquer um dos métodos isoladamente.

Figura 4 – Diagrama de Caixa Comparativa dos Resultados da SFA e DEA



Fonte: Autores (2025).

O modelo SFA mostra dispersão mais apertada, indicando resultados mais homogêneos com variações menos pronunciadas entre terminais. Isso sugere que a SFA atribui parte das diferenças de desempenho ao ruído aleatório, e não à pura ineficiência técnica. Por outro lado, a maior dispersão da DEA reflete sua sensibilidade às diferenças operacionais, pois interpreta toda variação de desempenho como ineficiência técnica. Do ponto de vista operacional, essa distinção traz implicações gerenciais concretas. Para terminais de menor eficiência, como Óbidos (78,67%) e Faro (84,77%), os resultados da SFA indicam que ganhos de eficiência são alcançáveis por meio de melhorias no agendamento de viagens e na otimização do fator de carga, independentemente de grandes investimentos em infraestrutura, já que o comprimento do cais (X_2) não foi estatisticamente significativo. Para Alenquer, cuja pontuação de eficiência da SFA é 33,02 pontos percentuais acima da sua pontuação DEA, o grande ajuste estocástico reflete exposição à variabilidade externa incontrolável — sugerindo que as prioridades gerenciais deveriam focar na resiliência operacional a interrupções sazonais, em vez da expansão da capacidade física.

5. CONCLUSÃO

A implementação da SFA revelou que a eficiência técnica na região é principalmente impulsionada pela frequência de viagem (X_1), com a área terminal (X_3) desempenhando um papel secundário. Monte Alegre emergiu como referência (97,11%), enquanto Óbidos (78,67%) requer intervenções de gestão operacional. A comparação com a DEA validou a robustez da SFA em contextos de alta variabilidade ambiental, evidenciado pelo ajuste positivo de eficiência para terminais expostos a fatores aleatórios. O estudo demonstrou que parte da ineficiência observada decorre de fatores aleatórios como flutuações climáticas extremas, variações no nível dos rios e falhas inesperadas de equipamentos – todos impactando o fluxo operacional e a capacidade.

Essa pesquisa avança nos estudos mais alinhados com as realidades amazônicas, onde fatores externos influenciam diretamente a eficiência, demonstrando que a SFA oferece uma perspectiva metodologicamente distinta e contextualmente adequada para ambientes de alta variabilidade. Em vez de afirmar superioridade absoluta sobre a DEA — uma alegação que exigiria testes formais mais robustos — os resultados mostram que a partição explícita do termo de erro estocástico (v_i) pela SFA fornece estimativas de eficiência menos suscetíveis à distorção pela aleatoriedade ambiental, fornecendo uma visão mais realista do desempenho gerencial em terminais sujeitos a variabilidade hidrológica pronunciada. O uso combinado de ambos os métodos fortalece a análise ao fornecer uma perspectiva abrangente que identifica tanto vulnerabilidades operacionais internas quanto ajustes para fatores externos imprevisíveis.

Esse trabalho aprofunda a compreensão da eficiência dos terminais hidroviários na Amazônia, oferecendo bases para políticas públicas e decisões gerenciais voltadas para a otimização operacional e o desenvolvimento sustentável da infraestrutura regional de transporte fluvial. Do ponto de vista político, os achados trazem implicações concretas para os atores institucionais. A Agência Nacional de Transportes Aquaviários (ANTAQ) poderia incorporar indicadores de eficiência derivados da SFA como um instrumento complementar de monitoramento junto com os painéis de desempenho portuário existentes,

permitindo uma distinção mais sutil entre terminais que enfrentam déficits operacionais reais e aqueles prejudicados por restrições ambientais estruturais. Contratos de concessão e desempenho para terminais hidroviários amazônicas devem incorporar índices de variabilidade hidrológica como fatores de ajuste, evitando que ciclos climáticos naturais penalizem operadores por circunstâncias fora de seu controle. Pesquisas futuras devem expandir o número de variáveis e terminais analisados — incorporando índices de sazonalidade hidrológica, indicadores regionais de demanda e dados de profundidade de navegabilidade — ao mesmo tempo em que exploram estruturas de dados em painel e a função de produção do Translog para capturar dinâmicas de eficiência ao longo do tempo e efeitos de interação de entrada.

5.1 Limitações do Estudo

Este estudo está sujeito a várias limitações que devem orientar a interpretação de seus achados. Primeiro, a amostra é composta por apenas dez Unidades de Tomada de Decisão (DMUs), o que restringe os graus de liberdade disponíveis para a estimativa de máxima probabilidade e reduz o poder estatístico necessário para obter estimativas significativas para os parâmetros de variância (γ e σ^2). Essa restrição deve ser reconhecida como uma limitação metodológica dos dados disponíveis para a região, e não como um reflexo de qualquer inadequação na própria estrutura da SFA. Segundo, a especificação de Cobb-Douglas assume elasticidade constante de substituição entre entradas e impõe retornos constantes à escala — pressupostos que podem não valer entre terminais de escalas operacionais substancialmente diferentes (por exemplo, Santarém versus Curuá). Pesquisas futuras devem testar a função de produção do Translog como uma alternativa mais flexível, permitindo retornos variáveis na escala e efeitos de interação de entrada. Terceiro, o modelo não incorpora variáveis que capturem sazonalidade hidrológica, demanda socioeconômica regional ou profundidade de navegabilidade — fatores que plausivelmente influenciam o fluxo terminal e cuja omissão pode introduzir viés de variáveis omitidas nos coeficientes estimados. Por fim, a natureza transversal do conjunto de dados impede a análise da dinâmica de eficiência ao longo do tempo, o que seria particularmente valioso em uma região passando por uma transformação significativa de infraestrutura após inaugurações recentes de terminais.

BIBLIOGRAFIA

Aigner, D., Lovell, C. A. K., & Schmidt, P. (1977). Formulation and estimation of stochastic frontier production function models. *Journal of Econometrics, 6*(1), 21-37. https://doi.org/10.1016/0304-4076(77)90052-5

Agência Pará. (2024a, November 4). *Government inaugurates Faro Waterway Terminal in Lower Amazon*. https://agenciapara.com.br/pauta/2089/governo-inaugura-terminal-hidroviario-de-faro-no-baixo-amazonas

Agência Pará. (2024b, November 4). *Government delivers Curuá Waterway Terminal in Lower Amazon*. https://agenciapara.com.br/noticia/23343/governo-entrega-terminal-hidroviario-de-curua-no-baixo-amazonas

Agência Pará. (2024, October 3). *Santarém receives Brazil's largest and most modern waterway terminal*. https://agenciapara.com.br/noticia/36400/santarem-ganha-o-maior-e-mais-moderno-terminal-hidroviario-do-brasil

Agência Pará. (2024, November 3). *Almeirim Waterway Terminal strengthens port infrastructure in Lower Amazon region*. https://www.agenciapara.com.br/noticia/46885/terminal-hidroviario-do-municipio-de-almeirim-reforca-a-estrutura-portuaria-na-regiao-do-baixo-amazonas

ANTAQ. (2024). *Waterway statistics from the National Waterway Transportation Agency*. Retrieved September 27, 2024, from https://web3.antaq.gov.br/ea/sense/movport.html#pt

Battese, G. E., & Corra, G. S. (1977). Estimation of a production frontier model: With application to the pastoral zone of eastern Australia. *Australian Journal of Agricultural Economics, 21*(3), 169-179. https://doi.org/10.1111/j.1467-8489.1977.tb00204.x

Campos, M. S. (2018). *A robust benchmarking analysis using Bayesian stochastic frontier method applied to Brazilian power distribution companies* [Doctoral dissertation, Federal University of Minas Gerais].

Charnes, A., Cooper, W. W., & Rhodes, E. (1978). Measuring the efficiency of decision making units. *European Journal of Operational Research, 2*(6), 429-444. https://doi.org/10.1016/0377-2217(78)90138-8

CNT. (2019). *General aspects of inland navigation in Brazil* (Vol. 1). National Transport Confederation.

Costa, D. S. (2020). *Efficiency analysis of Northern Region container terminals using Data Envelopment Analysis: A comparison with Brazil's main container terminals* [Master›s thesis, Federal University of Pará].

CPH. (2024). *Santarém Waterway Terminal*. Retrieved October 4, 2024, from https://cph-antigo.sysnog.com.br/content/terminal-hidrovi%C3%A1rio-de-santar%C3%A9m

Debreu, G. (1951). The coefficient of resource utilization. *Econometrica, 19*(3), 273-292. https://doi.org/10.2307/1906814

Falcão, V. A., & Correia, A. R. (2012). Port efficiency: Analysis of main methodologies for Brazilian ports case. *Journal of Transport Literature, 6*(4), 133-146. https://doi.org/10.1590/S2238-10312012000400007

Farrell, M. J. (1957). The measurement of productive efficiency. *Journal of the Royal Statistical Society: Series A (General), 120*(3), 253-290. https://doi.org/10.2307/2343100

Farias, V. J. da Cunha.; Pina, A.J.S.; Da Silva, T. L. (2025). Análise Da Eficiência De Terminais Hidroviários Por Meio Da Análise Envoltória De Dados: Um Estudo De Caso Na Região De Integração Do Baixo Amazonas. Book Chapter in Terra do Mar Doce Edição Especial COP 30: Contribuições da Academia para a Amazônia. https://doi.org/10.37885/250118781

Ghiara, H., & Tei, A. (2021). Atividade portuária e eficiência técnica: determinantes e fatores externos. *Maritime Policy & Management* , 48, 711-724. https://doi.org/10.1080/03088839.2021.1872807

G1. (2022, April 20). *Santarém Waterway Terminal begins operations this Thursday*. https://g1.globo.com/pa/santarem-regiao/noticia/2022/04/20/inaugurado-terminal-hidroviario-de-santarem-comeca-a-operar-nesta-quinta-21.ghtml

Krljan, T., Grbčić, A., Hess, S., & Grubišić, N. (2021). The Stochastic Frontier Model for Technical Efficiency Estimation of Interconnected Container Terminals. *Journal of Marine Science and Engineering*, 9, 515. https://doi.org/10.3390/JMSE9050515.

Koopmans, T. C. (1951). Analysis of production as an efficient combination of activities. In T. C. Koopmans (Ed.), *Activity analysis of production and allocation* (pp. 33-97). Wiley.

Kumbhakar, S. C., & Lovell, C. A. K. (2003). *Stochastic frontier analysis*. Cambridge University Press.

Loureiro, E. S. P. (2021). *Analysis of energy efficiency and affordability in Amazonian waterway passenger transport: A Data Envelopment Analysis approach* [Doctoral dissertation, Federal University of Pará].

López-Bermúdez, B., Freire-Seoane, M., & González-Laxe, F. (2019). Efficiency and productivity of container terminals in Brazilian ports (2008–2017). *Utilities Policy*. https://doi.org/10.1016/J.JUP.2018.11.006.

Maia, A. G. (n.d.). *Stochastic frontier models*. University of Campinas.

Meeusen, W., & van den Broeck, J. (1977). Efficiency estimation from Cobb-Douglas production functions with composed error. *International Economic Review, 18*(2), 435-444. https://doi.org/10.2307/2525757

Mello, M. N. (2019). *Application of stochastic frontier analysis in Brazilian power distributors: A case study* [Master›s thesis, Federal University of Ouro Preto].

Pereira, N. (2021). *Ports and terminals - From planning to operation* (1st ed.). Conceito Atual.

Pessanha, G. R. M., & Souza, G. S. (2003). *Stochastic frontier models*. EPGE/FGV.

Pina, A. J. S. (2024). *Operational efficiency assessment of passenger waterway terminals using Data Envelopment Analysis: A case study in Lower Amazon integration region* [Master›s thesis, Federal University of Pará].

Shephard, R. W. (1953). *Cost and production functions*. Princeton University Press.

Van Nguyen, Q., Pascoe, S., Coglan, L., & Nghiem, S. (2021). The sensitivity of efficiency scores to input and other choices in stochastic frontier analysis: an empirical investigation. *Journal of Productivity Analysis*, 1-10. https://doi.org/10.1007/s11123-020-00592-8.

Zhang, J., Yang, D., & Luo, M. (2024). Port Efficiency Types and Perspectives: A Literature Review. *Transport Policy*. https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2024.07.014.

ARTICLE 5

EVALUATION OF THE TECHNICAL EFFICIENCY OF WATERWAY TERMINALS USING STOCHASTIC BORDERS: AN APPLICATION IN WATERWAY TERMINALS IN THE LOWER AMAZON REGION IN PARÁ

Paulo Victor Souza Viégas (UFPA), Carolina Costa Ramos (UFPA) e Valcir João da Cunha Farias (UFPA)

RESUMO

Este estudo avalia a eficiência técnica de terminais hidroviários do Baixo Amazonas, Pará, utilizando a Análise de Fronteira Estocástica (SFA). A metodologia, aplicada a dez terminais, considerou variáveis como movimento de passageiros, número de viagens, comprimento do cais de atracação e área terminal. A função de produção Cobb-Douglas permitiu estimar os níveis de eficiência, capturando tanto a ineficiência técnica quanto a variabilidade externa. O terminal de Monte Alegre obteve a maior eficiência (97,11%), equilibrando frequência de viagens e infraestrutura. Em contraste, Óbidos registrou a menor (78,67%), indicando subutilização de recursos. A comparação com a Análise por Envoltória de Dados (DEA) revelou diferenças metodológicas significativas, como a atribuição pela SFA de eficiências maiores a terminais impactados por variáveis aleatórias, exemplificada pelo caso de Alenquer (+33,02%). A SFA mostrou-se uma ferramenta valiosa para o planejamento portuário regional.

Palavras-chave: Fronteira Estocástica, Eficiência Técnica, Terminais Hidroviários.

ABSTRACT

Este estudo avalia a eficiência técnica dos terminais hidroviários na região do Baixo Amazonas, no Brasil, utilizando a Análise de Fronteira Estocástica (SFA). Os dados operacionais — incluindo movimento de passageiros, número de viagens, comprimento de cais de atracação e área do terminal — de dez terminais foram analisados com a função de produção Cobb-Douglas. O modelo SFA capturou a ineficiência técnica e a variabilidade externa de maneira eficaz. Os resultados mostraram que o terminal Monte Alegre obteve a maior eficiência (97,11%) ao equilibrar a frequência das viagens e a infraestrutura. Por outro lado, Óbidos teve a menor eficiência (78,67%), provavelmente devido à subutilização de recursos. Uma comparação com a Análise Envoltória de Dados (DEA) revelou importantes diferenças metodológicas; A SFA atribuiu eficiências maiores aos terminais afetados por variáveis externas aleatórias, como visto no terminal de Alenquer (+33,02%). O estudo confirma que a SFA é uma ferramenta valiosa para a gestão e planejamento portuário..

Keywords: Fronteira Estocástica, Eficiência Técnica, Terminais Fluviais.

1. INTRODUCTION

Waterway transportation in Brazil is a fundamental component of the country's logistics, particularly due to its lower costs and extensive network of rivers and coastal routes. The nation boasts a vast waterway system, comprising approximately 63,000 kilometers (km) of navigable rivers, of which around 19,000 km are used for inland navigation (CNT, 2019). This aquatic infrastructure facilitates the transport of cargo and passengers, playing a key role in the export of commodities such as soybeans, iron ore, and agribusiness products.

According to Pereira (2021), ports serve as critical links in logistics chains, enabling diverse operational activities. In the first half of 2024, Brazilian port throughput reached approximately 646 million tons (ANTAQ, 2024). In the Amazon region, waterway transportation holds even greater significance due to its dense river network, which often serves as the primary transport route for remote areas.

The Lower Amazon region plays a crucial role in Brazilian waterway transportation, being responsible for the outflow of large volumes of agricultural and mineral products, as well as passenger transport in riverside communities. However, waterway terminals face challenges such as limited infrastructure and the need to improve operational efficiency. In this context, analyzing their technical efficiency is essential to understand operational performance and propose solutions that contribute to sector optimization.

Operational efficiency is a critical success factor for port terminals, particularly in a global context where competitiveness and demand for efficient logistics services are constantly growing. According to Lovell (1993), measuring technical efficiency provides an opportunity to investigate sources of inefficiency and explore factors that contribute to strong operational performance. Thus, analyzing characteristics such as the number of trips made and available passenger area offers valuable insights into the aspects that most significantly impact terminal productivity.

The assessment of the technical efficiency of the waterway terminals in Alenquer, Almeirim, Curuá, Faro, Monte Alegre, Óbidos, Prainha, Santana do Tapará, Santarém, and Terra Santa, using Stochastic Frontier Analysis (SFA), enables the identification of operational bottlenecks and the optimization of physical and logistical resources, which are essential to meet the growing demand for river transport in the Amazon region. This study examines four critical operational variables — number of trips, berth length, terminal area, and passenger movement — selected for their representativeness in the input-output relationship of the Lower Amazon terminals. These indicators, collected from ten units, provide a robust empirical basis to support public policies focused on port efficiency, addressing the logistical and socioeconomic challenges of the region.

This study evaluates the technical efficiency of ten waterway terminals in the Lower Amazon region using Stochastic Frontier Analysis (SFA), with three main objectives: (1) to measure individual efficiency levels, identifying the best-performing terminals and their operational characteristics; (2) to analyze the impact of variables such as trip frequency and terminal area on results; and (3) to compare findings with the DEA model to discuss how SFA's incorporation of stochastic factors changes efficiency interpretation. The results primarily reveal that terminals with higher trip frequency (X_1) tend to be more efficient, while the

comparison with DEA demonstrates that the latter overestimates inefficiency in units subject to external variability.

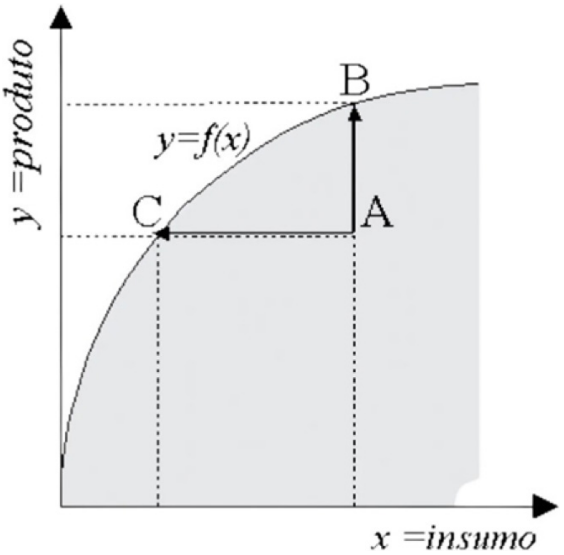
2. THEORETICAL FRAMEWORK

2.1 Efficiency Analysis Techniques

Efficiency analysis serves as a fundamental tool for assessing the performance of production units, including port terminals, which play a critical role in national and global logistics. Technical efficiency specifically evaluates how available resources are utilized to maximize output, whether in cargo handling or service provision. In the port sector, such analyses prove particularly valuable due to the direct impact of efficiency on both operational competitiveness and logistics costs. Within this framework, efficiency analysis techniques become essential, enabling the evaluation of different production units' performance and the identification of improvement opportunities (Zhang, 2024).

As demonstrated by Krljan (2021), the production possibility set (PPS) constitutes a central concept in efficiency analysis. This set represents all possible combinations of inputs (number of trips, terminal area) capable of generating a given output level (passenger throughput), as illustrated in Figure 1. The efficient frontier forms the outer boundary of the PPS, representing optimal production practices. This frontier can be estimated through various methods, depending on the analytical techniques and models employed. Production units operating on this frontier are considered efficient, while those below it exhibit varying degrees of inefficiency (Pessanha & Souza, 2003).

Figure 1- Production Possibility Set (PPS)



Source: Pessanha and Souza (2003).

The production frontier serves as a reference framework enabling performance comparison among different Decision-Making Units (DMUs) - in this study, the waterway terminals within the same sector. This direct frontier comparison allows for the classification of producers into two distinct groups: those operating at full efficiency and those demonstrating measurable inefficiency (López-Bermúdez et al., 2019).

Debreu's radial metric establishes that a producer's relative efficiency degree can be quantified by the vertical distance between its operational point and the production frontier (Kumbhakar & Lovell, 2003). This approach reveals production process suboptimality through measured deviations from the frontier function. According to this radial measurement, the technical efficiency of an output-oriented producer is expressed by:

$$TE_i = \frac{y_i}{f(x_i)} \quad (1)$$

Where $f(\boldsymbol{xi})$ represents the maximum feasible production, determined by the production frontier function, and $\boldsymbol{yi}$ denotes the actual observed production. By rearranging the terms and applying a logarithmic transformation, we obtain:

$$\ln y_i = \ln f(x_i, \beta) - u_i \quad (2)$$

Where:

$\boldsymbol{ui} = -\ln \boldsymbol{TEi} \geq \boldsymbol{0}$: measures technical inefficiency (non-negative by definition);
$\boldsymbol{f(xi, \beta)}$: represents the deterministic production frontier;
$\boldsymbol{\beta}$: denotes the vector of production function parameters to be estimated.

Thus, the technical efficiency of the i-th producer is given by:

$$TE_i = e^{-ui} \quad (3)$$

The models employed for efficiency analysis can be classified into two primary categories: deterministic and stochastic. Deterministic models operate under the assumption that all observed inefficiency is attributable solely to the production units, without accounting for potential random variations. A classic example of a deterministic approach is Data Envelopment Analysis (DEA), one of the most widely used techniques for assessing port terminal efficiency (Costa, 2020). As a non-parametric method, DEA employs linear programming to construct an efficiency frontier by benchmarking production units against one another. The principal limitation of DEA lies in its inability to differentiate between genuine inefficiency and random noise; consequently, any deviation from the frontier is interpreted as technical inefficiency.

In contrast, stochastic models explicitly account for output variations that may arise from factors beyond the production unit's control, including market fluctuations, weather conditions, and other unpredictable elements. A prominent stochastic technique is Stochastic Frontier Analysis (SFA). As a parametric method, SFA models a production unit's output as comprising two distinct components: (1) a random error term capturing unpredictable variability, and (2) a technical inefficiency component. This approach proves particularly valuable in operational environments subject to significant external randomness - such as port terminals, where cargo and passenger service demands may exhibit substantial temporal variability.

The Lower Amazon region exemplifies the importance of this methodological advancement, presenting unique operational challenges including pronounced seasonal water level variations and constrained infrastructure. These contextual factors make SFA particularly valuable, as its framework explicitly incorporates such environmental variables, yielding results that more faithfully represent local operational conditions.

Stochastic Frontier Analysis (SFA) is a parametric econometric approach that simultaneously models technical inefficiency and random external shocks, making it particularly suited to environments with significant uncontrollable variability — such as the Amazonian waterway context analyzed in this study.

This methodology distinguishes itself by explicitly modeling both inefficiency and random shocks, making it a powerful analytical tool for efficiency assessment in port terminals and various other sectors (Kumbhakar & Lovell, 2003). Traditional linear regression models estimate a mean function describing the central tendency relationship between inputs and outputs, without distinguishing random variability from technical inefficiency. In contrast, SFA extends this framework by estimating an envelope function representing the maximum feasible production level (under output orientation) for a given set of inputs. This advanced approach incorporates both technical inefficiency and stochastic noise components. The vertical distance between a production unit's observed performance and this frontier quantifies its inefficiency level (Pessanha & Souza, 2003).

The SFA model is formally expressed as follows:

$$y_i = TE_i \cdot f(x_i, \beta)e^{vi} \quad (4)$$

Given that $TEi\ TEi = e{-}ui$, the equation can be reformulated as follows:

$$y_i = f(x_i, \beta)e^{vi-ui} \quad (5)$$

Where:

$f(xi, \beta)evi$: Stochastic production frontier

yi: Scalar production output

xi : Input vector

vi : Random error term (symmetrically distributed)

ui: Technical inefficiency term (non-negative)

β : Technology parameter vector

The Stochastic Frontier Analysis (SFA) framework consequently comprises two distinct components: one deterministic and one stochastic. The deterministic component is represented by either a production function or cost function (this study employs a production function specification), which characterizes the systematic relationship between input factors (inputs) and production outputs.

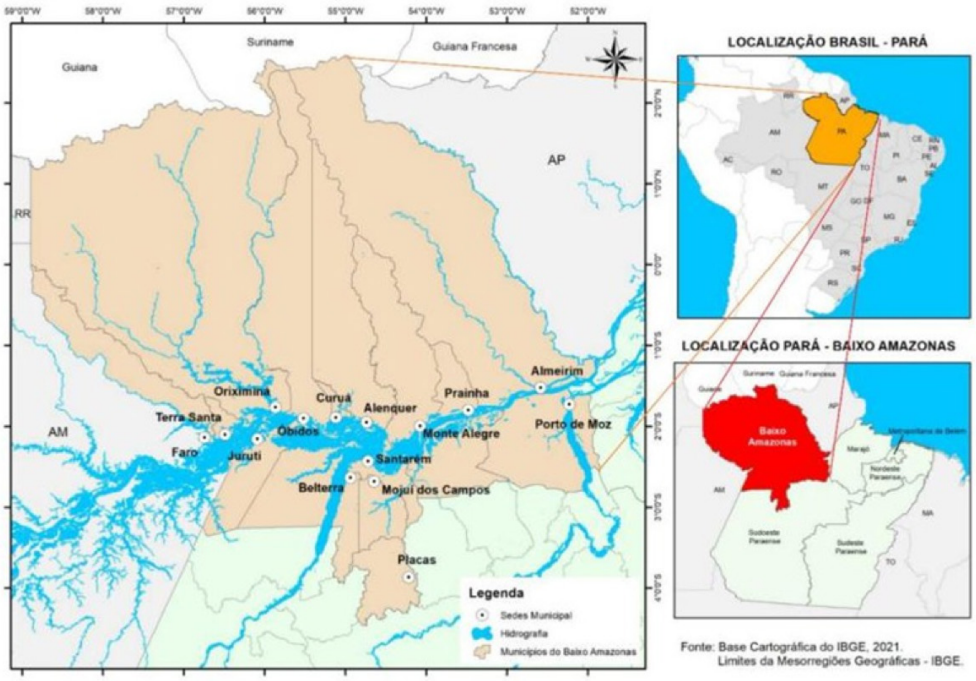
3. MATERIAL AND METHODS

3.1 Study Area

The Lower Amazon region (Figure 2), located in the state of Pará, Brazil, is strategically vital for national and international waterway transportation. Characterized by an extensive river network—including the Amazon, Tapajós, and Xingu rivers—the area directly connects Amazonian production zones to the Atlantic Ocean. This privileged geographic position facilitates the export of commodities such as grains and minerals, playing a pivotal role in agricultural product distribution and cargo/passenger logistics.

The waterway terminals in this region - including those in Alenquer, Almeirim, Curuá, Faro, Monte Alegre, Óbidos, Prainha, Santana do Tapará, Santarém, and Terra Santa - play a fundamental role in the local economy by facilitating market access and promoting population mobility. River transport serves as the primary connection for many riverside communities, who depend on these routes for access to essential goods and services, as well as for cargo and passenger transportation. In terms of infrastructure, the terminals face significant challenges, particularly in maintaining adequate and safe facilities. This study analyzed the operational efficiencies of ten waterway terminals in the Lower Amazon Integration Region (Table 1).

Figure 2 - Study Area



Source: PINNA (2024).

Tabela 1. Terminais Hidroviários Avaliados

ID	Municipality	Terminals
1	Santarém	Santarém Waterway Terminal
2	Óbidos	Óbidos Waterway Terminal
3	Faro	Faro Waterway Terminal
4	Monte Alegre	Monte Alegre Waterway Terminal
5	Curuá	Curuá Waterway Terminal
6	Alenquer	Alenquer Waterway Terminal
7	Almeirim	Almeirim Waterway Terminal
8	Prainha	Prainha Waterway Terminal
9	Terra Santa	Terra Santa Waterway Terminal
10	Santarém	Santana do Tapará Waterway Terminal

Source: Authors (2025).

3.2 Data Acquisition

The database used (Table 2), of cross-section type, was obtained from the study by Pina (2024) e Farias (2025), which employed the DEA methodology using the CCR model. The measurement units can be viewed in Table 3. The selected data, utilized in the reference study (Pina, 2024; Farias, 2025), proved relevant for assessing the technical efficiency of waterway terminals in the Lower Amazon region, as they represent the main operational aspects of the terminals, including passenger traffic, number of trips, docking berth length, and passenger terminal area.

Table 2. Data used in the model

Waterway Terminal	Passenger Traffic (Output)	Number of Trips (Input)	Docking Berth Length (Input)	Passenger Terminal Area (Input)
Alenquer	4800	120	15	770
Almeirim	5400	180	15	387
Curuá	2700	90	25	266,8
Faro	2250	90	15	266,8
Monte Alegre	4800	120	15	450
Óbidos	3600	120	25	595
Prainha	3600	120	15	305
Santana do Tapará	4500	150	15	266,8
Santarém	31116	420	200	3600
Terra Santa	4500	150	15	266,8

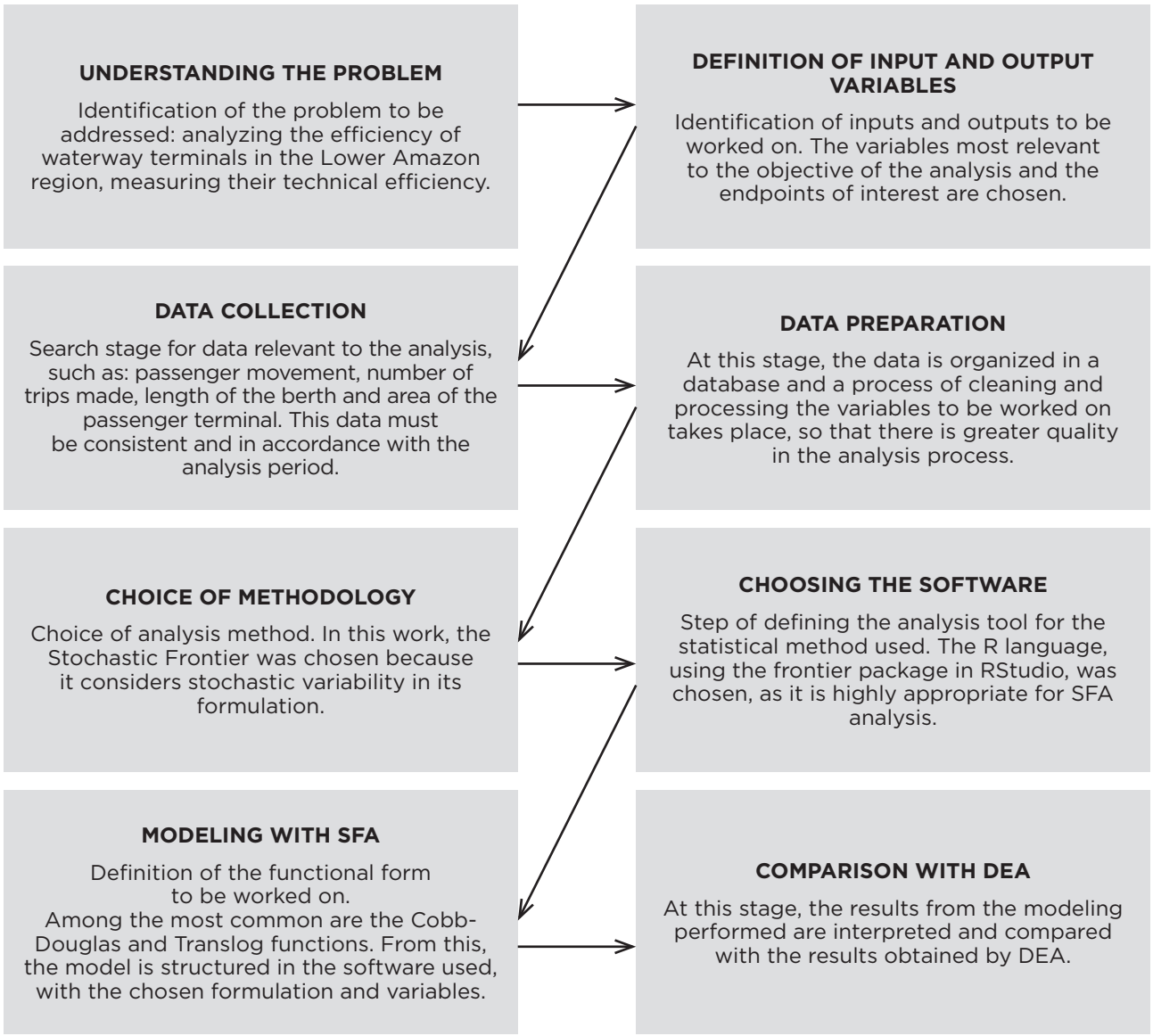
Source: Adapted from Pina (2024)

Although the dataset remains unchanged, the selection of SFA enables the capture of random effects' influence, yielding novel insights into the terminals' technical efficiency. Thus, this study complements the reference research by introducing a more robust methodology to account for external variations. The use of identical data reinforces the validity and comparability of the analyses, contributing to a more comprehensive assessment of technical efficiency across waterway terminals in the Lower Amazon region of Pará.

3.3 Data Processing

The flowchart (Figure 3) outlines the steps followed in this study's efficiency analysis. The research problem was first defined, establishing a focus on assessing the technical efficiency of waterway terminals in the Lower Amazon region.

Figure 3 – SFA Modeling Flowchart



Source: Authors (2025).

Subsequently, input and output variables were defined based on data from Pina (2024) e Farias (2025). After collection, data were processed in Excel, and the SFA modeling was conducted using RStudio with the *frontier* package, adopting a Cobb-Douglas production function. Three input variables and one output variable were incorporated, as detailed in Table 2.

The modeling results were then analyzed, highlighting aspects such as data dispersion and each terminal's efficiency. A comparison was made with findings from Pina (2024) e Farias (2025) DEA study, enabling identification of methodological differences and the unique insights provided by each approach.

As previously established, the SFA model structure was based on the Cobb-Douglas production function, which was linearized for application with maximum likelihood estimation - essential for parameter estimation in cross-section data contexts. This model employs three inputs and one output, representing a simplified relationship between terminal resource allocation and operational throughput. The selection of this production function is justified by its suitability for modeling production processes with constant elasticity of substitution between factors. The mathematical formulation of the linearized SFA model was structured as follows:

Where:

$\ln yi$: Dependent variable (logarithmically transformed). Represents the natural logarithm of production (or output) of the observed unit.

$\ln \beta_0$: Corresponds to the logarithm of the constant term in the equation, representing average productivity when all inputs equal zero (in logarithmic terms). β_0 is the production function's constant.

$\beta_j \ln x_{ji}$: Coefficients of independent variables (elasticities). Each β_j measures production elasticity relative to input x_j. The x_{ji} terms represent the logarithmically transformed production inputs (resources).

vi: Stochastic noise (random error). Captures uncontrollable external shocks.

$-ui$: Technical inefficiency. Represents the portion of production below the maximum frontier (due to inefficiencies).

$\forall\, i =$ **1,2, ... ,10**: Indicates the equation applies to each of the 10 observed units (e.g., 10 firms, years, or regions).

$$\ln y_i = \ln \beta_0 + \beta_1 \ln x_i + \cdots + \beta_n \ln x_n + \varepsilon_i$$

$$\ln y_i = \ln \beta_0 + \beta_1 \ln x_1 + \beta_2 \ln x_2 + \beta_3 \ln x_3 + v_i - u_i \qquad \forall\ i = 1,2, \ldots ,10.$$

4. RESULTS

4.1 Analysis of Technical Efficiency via SFA

Table 3 reveals significant disparities in terminal efficiency scores obtained through SFA. Monte Alegre (97.11%) and Santarém (93.34%) emerge as the most efficient units, reflecting the strong relationship between trip frequency (X_1 = 1.0708; p < 0.001) and available infrastructure (X_3 = 0.3168; p = 0.0015). Notably, Monte Alegre operates with 120 annual trips in a 450 m² area, suggesting logistical optimization. In contrast, Óbidos (78.67%) shows the lowest efficiency, likely due to underutilization of its docking berth (X_2 = 0.0031; p = 0.971), where its 25-meter length fails to translate into higher productivity. These findings support the initial premise that operational factors – beyond mere infrastructure – are critical determinants of efficiency in the region.

Table 3 – Efficiency Scores Estimated Using DEA and SFA

Waterway Terminal	SFA	DEA	SFA - DEA
Alenquer	91,85%	58,82%	33,02%
Almeirim	85,79%	100%	-14,21%
Curuá	94,73%	79,58%	15,15%
Faro	84,77%	66,32%	18,45%
Monte Alegre	97,11%	100%	-2,89%
Óbidos	78,67%	62,39%	16,29%
Prainha	92,14%	87,26%	4,88%
Santana do Tapará	93,40%	100%	-6,60%
Santarém	93,34%	100%	-6,66%
Terra Santa	93,40%	88,24%	5,16%

Source: Authors (2025).

The results of the maximum likelihood estimation (MLE) for the technical efficiency analysis of the Lower Amazon waterway terminals are presented in Table 4. In the Stochastic Frontier Analysis (SFA) model with a linearized *Cobb-Douglas* production function, X_1, X_2 e X_3 represent the inputs used to estimate the technical efficiency of waterway terminals. These variables are derived directly from the operational data collected (Table 2): X_1: Number of trips; X_2: Berth length (in meters); X_3: Passenger terminal area (in m²).

Table 4 – SFA Model Statistics

Parameters	Estimated value	Significance level
Intercepto	1,3302	0,0103
log(X1)	1,0708	1,73E-11
log(X2)	0,0031	Not significant
log(X3)	0,3168	0,0015
sigmaSq	0,0207	Not significant
g amma	0,7997	Not significant

Source: Authors (2025)

The analysis reveals an estimated intercept of 1.3302 with a standard error of 0.5182, showing statistical significance at the 5% level (p-value ≈ 0.01). This value represents the starting point of the production function on the logarithmic scale, indicating the expected output level when inputs are held constant.

The coefficient estimate for $\log(X_1)$ (number of trips) was 1.0708, showing high statistical significance (p-value < 0.001). This suggests that, ceteris paribus, a 1% increase in the number of trips leads to an expected 1.07% rise in passenger throughput. These results highlight the number of trips as the most influential productivity determinant among the model's variables for the analyzed terminals.

The estimated coefficient for $\log(X_2)$ (berth length) was 0.0031, showing no statistical significance (p-value = 0.971). This suggests that, within the model's context, berth length does not meaningfully influence output and could be excluded from future analyses or tested in alternative functional specifications.

Conversely, $\log(X_3)$ (terminal area) showed a coefficient of 0.3168, significant at the 1% level (p-value = 0.001). This indicates that a 1% increase in terminal area is associated with an expected 0.32% rise in passenger throughput, demonstrating that physical infrastructure plays a measurable, though relatively modest, role in terminal efficiency.

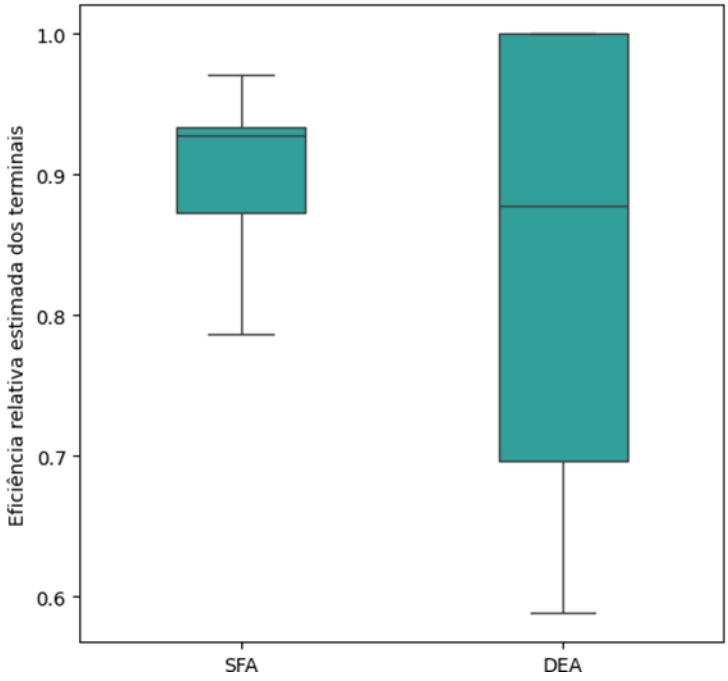
Beyond these parameters, sigma-squared (σ^2) was estimated at 0.0207 without statistical significance (p-value = 0.275), indicating low overall data variability, while gamma (γ) - measuring the proportion of total variance attributed to technical inefficiency - was estimated at 0.7997 but also lacked statistical significance (p-value = 0.104). This suggests the stochastic component plays a substantial role in output variability, though further refinement is needed to better distinguish between technical inefficiency and random noise. It is important to acknowledge that the non-significance of γ and σ^2 is likely attributable, at least in part, to the reduced sample size (n = 10 DMUs), which restricts the degrees of freedom available for maximum likelihood estimation. Consequently, the individual efficiency scores reported here should be interpreted as indicative estimates rather than definitive benchmarks, and their robustness would benefit from validation with larger samples and alternative model specifications, such as the Translog production function. Nonetheless, the results demonstrate that trip frequency (X_3) and terminal area (X_1) are the most significant variables for terminal efficiency, whereas berth length (X_2) showed no statistical relevance — a finding that may reflect structural homogeneity among the small-sized terminals in the sample, most of which share similar docking configurations.

4.2 SFA vs. DEA Comparison

The comparison with DEA results (Table 3) demonstrates that SFA assigns higher efficiency scores to 60% of terminals, particularly Alenquer (+33.02%) and Faro (+18.45%). This divergence occurs because SFA isolates the impact of random variables (e.g., seasonal river level variations) by incorporating them into the error term (v), whereas DEA interprets such variations as technical inefficiency. Conversely, terminals like Almeirim (-14.21%) and Santarém (-6.66%) showed maximum efficiency in DEA but not in SFA — indicating their performance may be overestimated when environmental stochasticity is disregarded. This distinction is particularly consequential in the Amazonian context, where the pronounced flood-and-drought cycle of the Amazon River — with seasonal water level amplitudes that can exceed 10 meters — directly conditions berthing times, navigational safety margins, and

vessel scheduling at riverine terminals. DEA, by treating all output deviations as managerial inefficiency, conflates these uncontrollable environmental shocks with genuine operational failures, thereby overestimating inefficiency for terminals most exposed to hydrological variability. The SFA framework, by explicitly partitioning these effects through the stochastic error term, yields a more policy-relevant picture: it identifies where managerial intervention can realistically improve performance and where institutional adaptation to climatic variability is the more appropriate strategic response. From a conceptual standpoint, the two methods thus answer different questions — DEA reveals relative performance under a deterministic benchmark, while SFA estimates efficiency net of uncontrollable environmental factors — and their combined use, as adopted in this study, provides a richer analytical framework than either method alone.

Figure 4 – Comparative Boxplot of SFA and DEA Results



Source: Authors (2025).

The SFA model shows tighter dispersion, indicating more homogeneous results with less pronounced variations between terminals. This suggests SFA attributes portions of performance differences to random noise rather than pure technical inefficiency. Conversely, DEA's wider dispersion reflects its sensitivity to operational differences, as it interprets all performance variation as technical inefficiency. From an operational standpoint, this distinction carries concrete managerial implications. For lower-efficiency terminals such as Óbidos (78.67%) and Faro (84.77%), the SFA results indicate that efficiency gains are achievable through improvements in trip scheduling and load factor optimization, independent of major infrastructure investment, since berth length (X_2) was not statistically significant. For Alenquer, whose SFA efficiency score is 33.02 percentage points above its DEA score, the large stochastic adjustment reflects exposure to uncontrollable external variability — suggesting that managerial priorities should focus on operational resilience to seasonal disruptions rather than on physical capacity expansion.

5. CONCLUSION

The SFA implementation revealed that technical efficiency in the region is primarily driven by trip frequency (X_1), with terminal area (X_3) playing a secondary role. Monte Alegre emerged as the benchmark (97.11%), while Óbidos (78.67%) requires operational management interventions. The comparison with DEA validated SFA's robustness in high environmental variability contexts, as evidenced by the positive efficiency adjustment for terminals exposed to random factors. The study demonstrated that part of the observed inefficiency stems from random factors like extreme weather fluctuations, river level variations, and unexpected equipment failures - all impacting operational flow and capacity.

This research advances studies better aligned with Amazonian realities where external factors directly influence efficiency, demonstrating that SFA offers a methodologically distinct and contextually appropriate perspective for high-variability environments. Rather than asserting outright superiority over DEA — a claim that would require more robust formal testing — the results show that SFA's explicit partitioning of the stochastic error term (vi) provides efficiency estimates that are less susceptible to distortion by environmental randomness, yielding a more realistic picture of managerial performance at terminals subject to pronounced hydrological variability. The combined use of both methods strengthens the analysis by providing a comprehensive perspective that identifies both internal operational vulnerabilities and adjustments for unpredictable external factors.

This work deepens the understanding of waterway terminal efficiency in the Amazon, offering foundations for public policies and managerial decisions targeting operational optimization and sustainable development of regional fluvial transport infrastructure. From a policy perspective, the findings carry concrete implications for institutional actors. The National Waterway Transportation Agency (ANTAQ) could incorporate SFA-derived efficiency indicators as a complementary monitoring instrument alongside existing port performance dashboards, enabling a more nuanced distinction between terminals facing genuine operational deficits and those impaired by structural environmental constraints. Concession and performance contracts for Amazonian waterway terminals should incorporate hydrological variability indices as adjustment factors, preventing

that natural climatic cycles penalize operators for circumstances beyond their control. Future research should expand the number of variables and terminals analyzed — incorporating hydrological seasonality indices, regional demand indicators, and navigability depth data — while also exploring panel data structures and the Translog production function to capture efficiency dynamics over time and input interaction effects.

5.1 Study Limitations

This study is subject to several limitations that should inform the interpretation of its findings. First, the sample comprises only ten Decision-Making Units (DMUs), which constrains the degrees of freedom available for maximum likelihood estimation and reduces the statistical power needed to yield significant estimates for the variance parameters (γ and σ^2). This constraint should be recognized as a methodological limitation of the data available for the region, rather than a reflection of any inadequacy in the SFA framework itself. Second, the Cobb-Douglas specification assumes constant elasticity of substitution between inputs and imposes constant returns to scale — assumptions that may not hold across terminals of substantially different operational scales (e.g., Santarém versus Curuá). Future research should test the Translog production function as a more flexible alternative, allowing for variable returns to scale and input interaction effects. Third, the model does not incorporate variables capturing hydrological seasonality, regional socioeconomic demand, or navigability depth — factors that plausibly influence terminal throughput and whose omission may introduce omitted-variable bias in the estimated coefficients. Finally, the cross-sectional nature of the dataset prevents analysis of efficiency dynamics over time, which would be particularly valuable in a region undergoing significant infrastructure transformation following recent terminal inaugurations.

BIBLIOGRAPHY

Aigner, D., Lovell, C. A. K., & Schmidt, P. (1977). Formulation and estimation of stochastic frontier production function models. Journal of Econometrics, 6(1), 21-37. https://doi.org/10.1016/0304-4076(77)90052-5

Agência Pará. (2024a, November 4). Government inaugurates Faro Waterway Terminal in Lower Amazon. https://agenciapara.com.br/pauta/2089/governo-inaugura-terminal-hidroviario-de-faro-no-baixo-amazonas

Agência Pará. (2024b, November 4). Government delivers Curuá Waterway Terminal in Lower Amazon. https://agenciapara.com.br/noticia/23343/governo-entrega-terminal-hidroviario-de-curua-no-baixo-amazonas

Agência Pará. (2024, October 3). Santarém receives Brazil's largest and most modern waterway terminal. https://agenciapara.com.br/noticia/36400/santarem-ganha-o-maior-e-mais-moderno-terminal-hidroviario-do-brasil

Agência Pará. (2024, November 3). Almeirim Waterway Terminal strengthens port infrastructure in Lower Amazon region. https://www.agenciapara.com.br/noticia/46885/terminal-hidroviario-do-municipio-de-almeirim-reforca-a-estrutura-portuaria-na-regiao-do-baixo-amazonas

ANTAQ. (2024). Waterway statistics from the National Waterway Transportation Agency. Retrieved September 27, 2024, from https://web3.antaq.gov.br/ea/sense/movport.html#pt

Battese, G. E., & Corra, G. S. (1977). Estimation of a production frontier model: With application to the pastoral zone of eastern Australia. Australian Journal of Agricultural Economics, 21(3), 169-179. https://doi.org/10.1111/j.1467-8489.1977.tb00204.x

Campos, M. S. (2018). A robust benchmarking analysis using Bayesian stochastic frontier method applied to Brazilian power distribution companies [Doctoral dissertation, Federal University of Minas Gerais].

Charnes, A., Cooper, W. W., & Rhodes, E. (1978). Measuring the efficiency of decision making units. European Journal of Operational Research, 2(6), 429-444. https://doi.org/10.1016/0377-2217(78)90138-8

CNT. (2019). General aspects of inland navigation in Brazil (Vol. 1). National Transport Confederation.

Costa, D. S. (2020). Efficiency analysis of Northern Region container terminals using Data Envelopment Analysis: A comparison with Brazil's main container terminals [Master's thesis, Federal University of Pará].

CPH. (2024). Santarém Waterway Terminal. Retrieved October 4, 2024, from https://cph-antigo.sysnog.com.br/content/terminal-hidrovi%C3%A1rio-de-santar%C3%A9m

Debreu, G. (1951). The coefficient of resource utilization. Econometrica, 19(3), 273-292. https://doi.org/10.2307/1906814

Falcão, V. A., & Correia, A. R. (2012). Port efficiency: Analysis of main methodologies for Brazilian ports case. Journal of Transport Literature, 6(4), 133-146. https://doi.org/10.1590/S2238-10312012000400007

Farrell, M. J. (1957). The measurement of productive efficiency. Journal of the Royal Statistical Society: Series A (General), 120(3), 253-290. https://doi.org/10.2307/2343100

Farias, V. J. da Cunha.; Pina, A.J.S.; Da Silva, T. L. (2025). Análise Da Eficiência De Terminais Hidroviários Por Meio Da Análise Envoltória De Dados: Um Estudo De Caso Na Região De Integração Do Baixo Amazonas. Book Chapter in Terra do Mar Doce Edição Especial COP 30: Contribuições da Academia para a Amazônia. https://doi.org/10.37885/250118781

Ghiara, H., & Tei, A. (2021). Atividade portuária e eficiência técnica: determinantes e fatores externos. Maritime Policy & Management , 48, 711-724. https://doi.org/10.1080/03088839.2021.1872807

G1. (2022, April 20). Santarém Waterway Terminal begins operations this Thursday. https://g1.globo.com/pa/santarem-regiao/noticia/2022/04/20/inaugurado-terminal-hidroviario-de-santarem-comeca-a-operar-nesta-quinta-21.ghtml

Krljan, T., Grbčić, A., Hess, S., & Grubišić, N. (2021). The Stochastic Frontier Model for Technical Efficiency Estimation of Interconnected Container Terminals. Journal of Marine Science and Engineering, 9, 515. https://doi.org/10.3390/JMSE9050515.

Koopmans, T. C. (1951). Analysis of production as an efficient combination of activities. In T. C. Koopmans (Ed.), Activity analysis of production and allocation (pp. 33-97). Wiley.

Kumbhakar, S. C., & Lovell, C. A. K. (2003). Stochastic frontier analysis. Cambridge University Press.

Loureiro, E. S. P. (2021). Analysis of energy efficiency and affordability in Amazonian waterway passenger transport: A Data Envelopment Analysis approach [Doctoral dissertation, Federal University of Pará].

López-Bermúdez, B., Freire-Seoane, M., & González-Laxe, F. (2019). Efficiency and productivity of container terminals in Brazilian ports (2008–2017). Utilities Policy. https://doi.org/10.1016/J.JUP.2018.11.006.

Maia, A. G. (n.d.). Stochastic frontier models. University of Campinas.

Meeusen, W., & van den Broeck, J. (1977). Efficiency estimation from Cobb-Douglas production functions with composed error. International Economic Review, 18(2), 435-444. https://doi.org/10.2307/2525757

Mello, M. N. (2019). Application of stochastic frontier analysis in Brazilian power distributors: A case study [Master's thesis, Federal University of Ouro Preto].

Pereira, N. (2021). Ports and terminals - From planning to operation (1st ed.). Conceito Atual.

Pessanha, G. R. M., & Souza, G. S. (2003). Stochastic frontier models. EPGE/FGV.

Pina, A. J. S. (2024). Operational efficiency assessment of passenger waterway terminals using Data Envelopment Analysis: A case study in Lower Amazon integration region [Master's thesis, Federal University of Pará].

Shephard, R. W. (1953). Cost and production functions. Princeton University Press.

Van Nguyen, Q., Pascoe, S., Coglan, L., & Nghiem, S. (2021). The sensitivity of efficiency scores to input and other choices in stochastic frontier analysis: an empirical investigation. Journal of Productivity Analysis, 1-10. https://doi.org/10.1007/s11123-020-00592-8.

Zhang, J., Yang, D., & Luo, M. (2024). Port Efficiency Types and Perspectives: A Literature Review. Transport Policy. https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2024.07.014.

ARTIGO 6

SEGURANÇA VIÁRIA E GESTÃO URBANA: PADRÕES ESPACIAIS E PREDIÇÃO DE RISCO DE FATALIDADE ENTRE MOTOCICLISTAS NO SISTEMA RODOVIÁRIO DO DISTRITO FEDERAL (2014–2023)

Janduhy Pereira dos Santos (DER/DF), Valdir Adilson Steinke, Maurício Theodósio Mattos Marques, Ricardo Sameshima Taba, Andrea Amaziles A. A. de Carvalho Lousada, Bruno Maia Soriano Lousada, Jesus Mauro Vieira de Oliveira e Caroline Ribeiro Chahini

RESUMO

Este artigo investiga a dinâmica espacial e os fatores associados à gravidade de acidentes envolvendo motociclistas no Distrito Federal, com base em dados de acidentes rodoviários (2014–2023). Adota-se um fluxo analítico que combina análise espacial para detecção de áreas críticas (Getis-Ord Gi*), modelagem preditiva por gradient boosting (XGBoost) e balanceamento de classes (SMOTE), com interpretação da importância dos preditores via SHAP. A avaliação baseia-se em partição treino–teste estratificada, priorizando a comparação de desempenho e a leitura substantiva das variáveis. Os achados indicam padrões concentrados no espaço urbano e a relevância de características do evento, do contexto operacional e de aspectos temporais na explicação do risco. As evidências resultantes subsidiam estratégias de segurança viária voltadas à priorização territorial, à fiscalização direcionada e a ações de moderação de velocidade, contribuindo para o planejamento intersetorial e para a redução de desfechos graves entre motociclistas.

Palavras-chave: acidentes de trânsito; motocicletas; análise espacial

ABSTRACT

This study investigates the spatial dynamics and factors associated with the severity of motorcycle-involved road crashes in Brazil's Federal District, using crash records from 2014 to 2023. An analytical workflow is adopted that combines spatial statistics to detect critical areas (Getis-Ord Gi*), predictive modeling via gradient boosting (XGBoost), and class imbalance handling with SMOTE, with predictor importance interpreted using SHAP. Model evaluation relies on a stratified train–test split, prioritizing comparative performance assessment and the substantive interpretation of predictors. The results highlight the relevance of event-specific attributes, operational context, and temporal factors in explaining risk. The resulting evidence informs road safety strategies focused on geographic prioritization, targeted enforcement, and speed management measures, supporting cross-sector planning and the reduction of severe outcomes among motorcyclists.

Keywords: Road traffic accidents; Motorcycles; Spatial analysis.

1. INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, o crescimento urbano acelerado no Brasil tem provocado transformações significativas nas dinâmicas territoriais e nos padrões de mobilidade, especialmente nas grandes metrópoles. A expansão periférica, associada à insuficiência e à baixa atratividade dos sistemas de transporte coletivo, tem impulsionado o aumento da frota de veículos motorizados, com destaque para as motocicletas. Nesse contexto, esse modal passou a desempenhar papel estratégico na mobilidade urbana, seja como alternativa aos congestionamentos, seja como instrumento de inserção no mercado de trabalho, sobretudo em atividades mediadas por plataformas digitais.

No Distrito Federal, essa dinâmica se intensificou de forma expressiva, impulsionada por fatores econômicos e estruturais. A partir de 2015, a crise econômica e a reconfiguração do mercado de trabalho contribuíram para o crescimento de ocupações informais, muitas das quais dependentes do uso da motocicleta. Esse processo foi ainda mais acentuado durante a pandemia da COVID-19, com a ampliação dos serviços de entrega e transporte individual. Como resultado, observou-se aumento significativo da frota de motocicletas, acompanhado por elevação nos registros de acidentes de trânsito envolvendo esse grupo de usuários, que se destacam como um dos mais vulneráveis no sistema viário (SENATRAN, 2024; DETRAN-DF, 2024).

Do ponto de vista da segurança viária, a literatura recente tem avançado no sentido de superar abordagens centradas exclusivamente na identificação de pontos críticos, incorporando perspectivas sistêmicas baseadas na gestão do risco, como o paradigma do Safe System. Essa abordagem reconhece a vulnerabilidade dos usuários e a inevitabilidade do erro humano, atribuindo aos gestores do sistema a responsabilidade de estruturar vias, regular velocidades e organizar o tráfego de forma a minimizar a ocorrência de lesões graves e fatais (OECD/ITF, 2008; WHO, 2023).

Nesse contexto, a análise espacial e a modelagem preditiva têm se consolidado como ferramentas fundamentais para a compreensão da acidentalidade, permitindo não apenas identificar padrões territoriais, mas também estimar probabilidades de ocorrência de desfechos graves. Estudos recentes têm aplicado técnicas como estatística espacial e algoritmos de aprendizado de máquina para investigar fatores associados à severidade dos acidentes, evidenciando a relevância de variáveis relacionadas ao ambiente viário, ao comportamento dos usuários e às condições operacionais do sistema de transporte.

No entanto, apesar dos avanços metodológicos, ainda há lacunas importantes na literatura, especialmente no que se refere à integração entre análises espaciais tradicionais — voltadas à identificação de áreas de concentração de eventos — e abordagens preditivas capazes de estimar o risco condicional de fatalidade. Em muitos estudos, essas dimensões são tratadas de forma isolada, o que limita a compreensão integrada do fenômeno e reduz o potencial de aplicação dos resultados no planejamento da segurança viária.

Diante desse cenário, este estudo tem como objetivo (i) identificar padrões espaciais de acidentes envolvendo motociclistas no Sistema Rodoviário do Distrito Federal (2014–2023) e (ii) desenvolver um modelo preditivo de risco de fatalidade, com base em técnicas de aprendizado de máquina, com o objetivo de identificar fatores críticos associados à severidade dos eventos.

A principal contribuição deste artigo reside na integração entre análise espacial de concentração de acidentes (Getis-Ord Gi*) e modelagem preditiva de risco condicional de fatalidade (XGBoost), permitindo distinguir empiricamente duas dimensões frequentemente confundidas na literatura: (i) onde os acidentes são mais frequentes e (ii) onde a probabilidade de ocorrência de óbito é mais elevada. Essa abordagem combinada possibilita uma leitura mais precisa do risco viário, contribuindo para a priorização de intervenções diferenciadas no território.

Adicionalmente, o estudo avança ao aplicar essa integração metodológica em escala de rede rodoviária, incorporando variáveis operacionais e temporais e explorando técnicas de interpretação de modelos (SHAP), o que amplia a compreensão dos mecanismos associados à gravidade dos acidentes. Embora as técnicas empregadas sejam amplamente reconhecidas na literatura, sua aplicação conjunta, com foco na distinção entre risco absoluto e risco condicional, constitui um avanço analítico relevante no campo da segurança viária.

Os resultados obtidos oferecem subsídios para o planejamento e a gestão da mobilidade, contribuindo para o direcionamento de ações de engenharia, fiscalização e educação no trânsito, em consonância com abordagens orientadas por evidências e pela redução de mortes e lesões graves.

2. REVISÃO DE LITERATURA

Nos últimos trinta anos, o uso das motocicletas tem passado por mudanças significativas em sua finalidade. Antes, esses veículos eram usados principalmente para lazer e deslocamentos individuais, com pouca utilização para fins laborais. Contudo, o avanço do processo de metropolização nas grandes cidades, aliado ao aumento da demanda por serviços terceirizados e entregas rápidas, fez com que a frota de motocicletas crescesse de forma expressiva em diversos países.

Em transporte e segurança viária, o debate contemporâneo enfatiza que reduzir a mortalidade exige combinar gestão de risco, governança e monitoramento com intervenções integradas em infraestrutura, velocidades seguras, veículos, fiscalização e atendimento pós-acidente. Relatórios de síntese têm apontado que, embora haja leve redução recente, a carga global de mortes no trânsito permanece elevada, reforçando a necessidade de estratégias orientadas por evidências e por indicadores de desempenho e risco, e não apenas por contagens absolutas de eventos (WHO, 2023).

Apesar do consenso crescente na literatura quanto à necessidade de abordagens sistêmicas baseadas na gestão do risco, observa-se que muitos estudos ainda se concentram na identificação de padrões agregados de ocorrência de acidentes, sem incorporar explicitamente a distinção entre

frequência de eventos e probabilidade de desfechos graves. Essa limitação reduz o potencial de aplicação dos resultados no planejamento de intervenções mais direcionadas, especialmente em contextos onde a exposição e a severidade não coincidem espacialmente.

Para usuários vulneráveis — como motociclistas — essa agenda é particularmente relevante, pois a severidade tende a aumentar com a exposição a altas velocidades e com conflitos em ambientes viários que não foram desenhados para absorver impactos. Por isso, estudos baseados em localização e predição devem ser articulados a uma lógica de gestão do risco: onde a infraestrutura e a operação podem ser redesenhadas para reduzir energia de colisão e separar conflitos, em alinhamento com os princípios do Safe System (OECD/ITF, 2008; European Commission, 2023).

Assim, Santos Júnior *et al*. (2022) descrevem os acidentes de trânsito fatais como um problema complexo e desafiador para as autoridades públicas. Os autores salientam comportamentos de risco no trânsito urbano e os elevados custos sociais e econômicos dos acidentes de trânsito fatais, defendendo ações intersetoriais e o aperfeiçoamento da vigilância. Esses prejuízos incluem a sobrecarga dos serviços de saúde e assistência previdenciária, refletindo os elevados custos sociais e econômicos associados à acidentalidade envolvendo motocicletas.

A preocupação em garantir condições seguras para os motociclistas envolve todos os setores que compõem a mobilidade urbana. Nesse contexto, Brenac *et al*. (2006) destacam a importância da visibilidade dos motociclistas nas vias, enfatizando que a dificuldade de um objeto ou indivíduo ser percebido visualmente em meio ao ambiente é um fator recorrente nos acidentes ocorridos em áreas urbanas.

A mesma preocupação se estende às estradas rurais, onde o uso das motocicletas assume uma diversidade de funções além do simples deslocamento do condutor. Agyemang, Adanu e Jones (2021) analisam os acidentes com motocicletas nas zonas rurais de Gana e destacam que esses eventos são frequentemente negligenciados pelas políticas públicas. Os autores apontam que a precariedade das vias, o acesso limitado a serviços de emergência e o comportamento de risco por parte dos condutores afetam diretamente a gravidade das lesões registradas nesses contextos.

Na elaboração e execução de políticas públicas voltadas à segurança viária, instrumentos analíticos, como as ferramentas de geoinformação, tornam-se fundamentais para identificar áreas críticas e propor intervenções eficazes para a redução dos acidentes de trânsito. Estudos como os de Tippayanate *et al*. (2024) e Haque *et al*. (2010) evidenciam o potencial das técnicas de análise espacial na identificação de padrões territoriais de acidentes envolvendo motocicletas, contribuindo para o direcionamento de ações preventivas. De modo geral, esses estudos demonstram a eficácia das técnicas de análise espacial na identificação de áreas críticas. No entanto, a maior parte das abordagens permanece centrada na detecção de clusters de ocorrência, sem avançar na modelagem do risco condicional à ocorrência do evento. Essa limitação pode levar à priorização de áreas com alto volume de acidentes, mas não necessariamente

com maior probabilidade de fatalidade. Complementarmente, Miao *et al*. (2025) demonstram, por meio de modelos espaço-temporais aplicados à China, que a ausência do uso do capacete está fortemente associada à gravidade dos acidentes, reforçando a importância de dados georreferenciados para decisões baseadas em evidências.

A aplicação de técnicas de geoinformação tem se mostrado estratégica na formulação de políticas públicas de mobilidade e segurança viária. Estudos como o de Jiang, Yuen e Lee (2020) demonstram como a integração entre mineração de regras de associação e análise espacial, por meio de Sistemas de Informação Geográfica (SIG), possibilita não apenas identificar fatores críticos associados a acidentes envolvendo motociclistas, mas também mapear os territórios onde esses fatores convergem. Pesquisas internacionais que aplicam a técnica do XGBoost em predições de gravidade de acidentes viários, como Wisutwattanasak *et al*. (2024) em acidentes envolvendo motociclistas na Tailândia; Chen *et al*. (2025), com otimização MSCPO-XGBoost na China; Qian e Wang (2023), em acidentes britânicos; e Yang *et al*. (2022), em rodovias americanas, evidenciam a robustez da técnica para capturar fatores não lineares e interpretar variáveis contextuais em estudos de segurança viária. Apesar do avanço no uso de algoritmos de aprendizado de máquina para previsão da severidade dos acidentes, observa-se que essas abordagens frequentemente não incorporam explicitamente a dimensão espacial dos fenômenos, tratando a localização predominantemente como uma variável explicativa adicional, sem explorar plenamente sua estrutura espacial. Além disso, há pouca integração entre modelos preditivos e análises espaciais exploratórias, o que limita a compreensão conjunta dos padrões territoriais e dos mecanismos de risco.

Assim sendo, conforme detalha Panumasvivat *et al*. (2024), a tomada de decisão em políticas públicas de mobilidade conta com as técnicas geoespaciais como suporte essencial para a identificação de fatores de risco, não apenas para os motociclistas, mas também para os demais usuários dos sistemas de transporte, tanto em áreas urbanas quanto rurais. Essas ferramentas possibilitam a implementação de medidas como intervenções de engenharia de tráfego, intensificação da fiscalização, melhorias na infraestrutura viária e campanhas de conscientização direcionadas a horários e locais específicos.

Ao gerar mapas preditivos e de aglomerados de alta incidência com embasamento estatístico, o estudo encaminha sugestões de intervenções em infraestrutura, fiscalização e campanhas educativas. Assim, as técnicas geoespaciais deixam de ser meros instrumentos técnicos para se consolidarem como ferramentas auxiliares de justiça territorial e prevenção de acidentes. Adicionalmente, embora diversos estudos apontem a relevância de variáveis relacionadas à geometria das vias, velocidades regulamentadas e volumes de tráfego na explicação da severidade dos acidentes, a disponibilidade e padronização desses dados ainda representam um desafio em muitos contextos institucionais. Essa limitação tem levado pesquisadores a utilizarem dados espaciais e operacionais, como a localização geográfica e características do evento, como forma de capturar parcialmente esses efeitos.

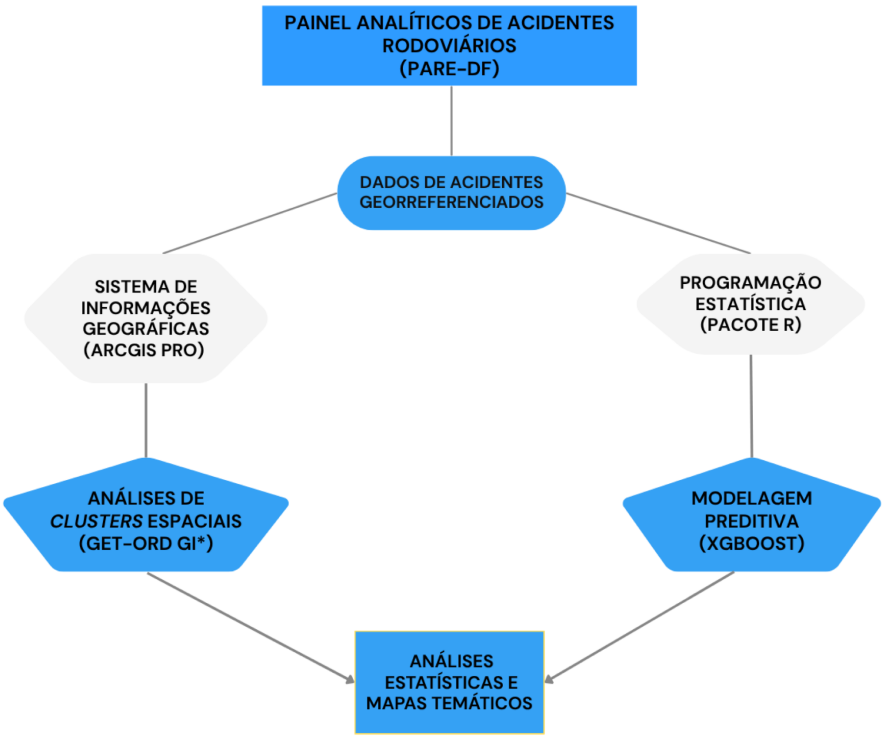
3. METODOLOGIA

A presente pesquisa adota uma abordagem quantitativa com ênfase em métodos de análise espacial, visando identificar padrões de distribuição e fatores associados aos acidentes de trânsito envolvendo motociclistas no Sistema Rodoviário do Distrito Federal (SRDF).

Assim, este estudo estrutura-se em três eixos interligados (Figura 1), conforme o organograma metodológico: (i) organização, limpeza e padronização da base de dados, com geocodificação dos registros e integração à malha rodoviária do SRDF; (ii) análise espacial por meio do método *Hot Spot Analysis* (Getis-Ord Gi*) para identificação de zonas críticas (*hot spots*) e de baixa incidência (*cold spots*) de acidentes envolvendo motociclistas; e (iii) modelagem preditiva utilizando o algoritmo XGBoost, visando identificar os fatores críticos que aumentam a probabilidade de fatalidades.

A integração dessas etapas resultou na produção de análises estatísticas e mapas temáticos, que permitem visualizar os padrões de ocorrência dos acidentes, localizar aglomerações significativas de acidentes envolvendo motociclistas e estimar probabilidades de risco em diferentes segmentos rodoviários.

Figura 1 — Organograma metodológico.



Fonte: Autores.

3.1. Organização e Tratamento dos Dados

Os registros utilizados na presente análise foram extraídos do geovisualizador DERGeo (Santos *et al.*, 2023), uma plataforma desenvolvida pelo Departamento de Estradas de Rodagem do Distrito Federal (DER-DF) que disponibiliza, por meio do módulo PARE-DF (Painel Analítico de Acidentes de Trânsito no Distrito Federal), informações georreferenciadas sobre acidentes ocorridos na malha rodoviária sob sua jurisdição. Essa ferramenta viabiliza o acesso a uma base espacial estruturada, o que possibilitou a aplicação de técnicas estatísticas e de geoinformação ao longo do estudo.

O conjunto de dados analisado compreende 9.055 registros de acidentes com motociclistas, georreferenciados em coordenadas UTM (fuso 23S, Datum SIRGAS 2000), ocorridos no SRDF entre os anos de 2014 e 2023. As ocorrências incluem informações detalhadas, como data da ocorrência, natureza do acidente e categorias de veículos envolvidos, além da geolocalização de cada evento.

Previamente às análises espaciais e estatísticas, a base de dados foi submetida a um processo de pré-processamento no software Microsoft Excel, com foco na preparação e estruturação dos registros. As etapas envolveram: identificação e eliminação de duplicidades e inconsistências, padronização das variáveis categóricas (como tipo e natureza do acidente, dia da semana e categoria do veículo), conversão de formatos temporais (data e hora) para estruturas reconhecíveis por sistemas de informações geográficas e validação das coordenadas geográficas. Esse procedimento assegurou a consistência semântica e a integridade sintática dos dados, viabilizando sua posterior importação e manipulação em ambiente geoespacial no ArcGIS Pro.

3.2. Análise espacial e preditiva

A presente etapa metodológica combina técnicas de análise espacial com métodos de aprendizado de máquina, visando aprofundar a compreensão dos padrões de risco associados a acidentes envolvendo motociclistas no Sistema Rodoviário do Distrito Federal.

Inicialmente, foi aplicada a técnica de *Hot Spot Analysis* (Getis-Ord Gi*), implementada no software ArcGIS Pro 3.5.1, com o objetivo de identificar agrupamentos estatisticamente significativos de alta e baixa concentração de eventos. Essa etapa caracteriza-se como uma análise exploratória espacial, voltada à identificação de padrões de ocorrência (frequência de acidentes) ao longo da rede viária.

Em uma segunda etapa, foi desenvolvido um modelo preditivo utilizando o algoritmo XGBoost, implementado no ambiente R (versão 4.3.2), com o objetivo de estimar a probabilidade de ocorrência de óbitos condicionada à ocorrência do acidente. Diferentemente da análise espacial exploratória, essa abordagem incorpora uma dimensão explicativa e prognóstica, permitindo identificar fatores associados à severidade dos eventos.

A utilização combinada dessas duas abordagens permite distinguir analiticamente duas dimensões complementares: (i) a concentração espacial de acidentes e (ii) o risco condicional de fatalidade, contribuindo para uma interpretação mais abrangente da segurança viária.

Neste estudo, a espacialidade foi tratada de forma complementar: de um lado, por análise espacial exploratória da concentração de acidentes (Getis-Ord Gi*); de outro, pela incorporação das coordenadas geográficas como proxies locacionais no modelo preditivo, ao lado de variáveis temporais, operacionais e relacionadas à natureza do acidente.

3.2.1. Algoritmo Getis-Ord Gi*

A identificação de áreas de concentração foi realizada pelo método *Hot Spot Analysis* (Getis-Ord Gi*), que estima a associação espacial local com base em matrizes de vizinhança e pesos espaciais, permitindo destacar *clusters* de valores elevados/baixos com significância estatística (Getis; Ord, 1992).

Um ponto quente é uma área ou local dentro de um limite identificável que apresenta uma concentração de incidentes. Os processos principais para estimar aglomerados de acidentes incluem a análise de acidentes de trânsito georreferenciados e o mapeamento de clusters utilizando as funções Getis-Ord Gi*.

A estatística local de associação espacial é dada por:

$$G_i^* = \frac{\sum_j w_{ij} x_j - \bar{X} \sum_j w_{ij}}{S \sqrt{\frac{n \sum_j w_{ij}^2 - \left(\sum_j w_{ij}\right)^2}{n-1}}} \quad (1)$$

Onde:

$Gi*$ é o valor do índice para a localização i.
xj é o valor do atributo na localização j.
wi, j é o peso espacial entre as localizações i e j.

X é a média dos valores do atributo.
S é o desvio padrão dos valores do atributo.
n é o número total de localizações.

O método avalia a intensidade da concentração espacial de eventos a partir dos valores atribuídos a cada feição e aos seus vizinhos imediatos, identificando agrupamentos estatisticamente significativos de altas ocorrências (*hot spots*) e baixas ocorrências (*cold spots*).

Para a definição da vizinhança espacial, adotou-se o critério de distância fixa de 1.500 metros. A escolha desse parâmetro baseou-se em testes preliminares de autocorrelação espacial, Índice de Moran Global (Global Moran's I), e na análise da conectividade da malha rodoviária do SRDF, considerando a escala média de interação entre segmentos viários urbanos e periurbanos. Distâncias inferiores resultaram em fragmentação excessiva dos clusters, enquanto distâncias superiores tenderam a diluir padrões locais relevantes.

Foi utilizada uma matriz de pesos espaciais do tipo distância fixa, garantindo comparabilidade entre feições com diferentes números de vizinhos. O nível de significância adotado foi de 95% ($p < 0,05$), com interpretação baseada em valores de *z-score* e *p-value*.

A operacionalização foi realizada integralmente no ArcGIS Pro, utilizando a ferramenta *Hot Spot Analysis* (Getis-Ord Gi*), permitindo a classificação dos resultados em cinco categorias (muito baixo, baixo, neutro, alto e muito alto).

3.2.2. Modelagem Preditiva Com Xgboost

Para a etapa preditiva do estudo, foi empregado o algoritmo XGBoost (*Extreme Gradient Boosting*), pertencente à classe dos métodos de *ensemble learning*, mais especificamente à técnica de *boosting*. Este algoritmo constrói, de forma sequencial, uma série de árvores de decisão (*weak learners*), onde cada nova árvore é ajustada para corrigir os erros das anteriores, otimizando uma função objetivo por meio de gradiente descendente (CHEN *et al.*, 2025).

A modelagem preditiva foi implementada no ambiente R (versão 4.3.2), utilizando o pacote *xgboost*, enquanto as etapas de análise espacial exploratória foram conduzidas no software ArcGIS Pro, versão

3.5.1. Essa separação reflete a natureza complementar das abordagens: o ambiente SIG para análise espacial e o ambiente estatístico para modelagem preditiva.

O XGBoost é particularmente eficaz em tarefas de classificação binária, como a adotada neste estudo — prever a ocorrência de acidentes com vítima fatal (1) ou não fatal (0) —, por sua capacidade de modelar relações não lineares, lidar com dados desbalanceados e por oferecer mecanismos integrados de regularização, que reduzem o risco de *overfitting*.

A função objetivo geral do XGBoost pode ser expressa como:

Onde:

ℓ é a função de perda (*loss functio*n);
$\hat{y}_i^{(t)}$ é a previsão no estágio t;
é o termo de regularização;
γ é o custo de complexidade por folha da árvore;
T é o número de folhas;
λ é o coeficiente de regularização L2;
w é o vetor de pesos da árvore.

$$\mathcal{L}^{(t)} = \Sigma_{i=1}^{n} \ell\left(y_i, \hat{y}_i^{(t-1)} + f_t(x_i)\right) + \Omega(f_t), \Omega(f) = \gamma \cdot T + (\lambda/2) \cdot \Sigma_{j=1}^{T} w_j^2 \qquad (2)$$

A predição para a instância xi após t árvores é dada por:

$$\hat{y}_i = \Sigma_{k=1}^{K} f_k(x_i), f_k \in \mathfrak{F} \qquad (3)$$

Onde $\boldsymbol{F}$ representa o espaço das possíveis árvores de decisão.

Inicialmente, os dados passaram por uma etapa de tratamento e organização, que incluiu: (i) criação de variáveis categóricas; (ii) verificação de valores ausentes e eliminação de registros inconsistentes; (iii) transformação do campo de data para o formato adequado; e (iv) para lidar com desbalanceamento entre as classes, aplicou-se o SMOTE (*Synthetic Minority Over-Sampling Technique*), que gera instâncias sintéticas na vizinhança da minoria, reduzindo o viés do classificador sem mera duplicação de observações (Chawla *et al*., 2002).

O conjunto de dados foi dividido em 70% para treinamento e 30% para teste, utilizando amostragem estratificada. A opção por uma única divisão treino–teste teve como objetivo preservar a clareza do modelo e permitir a comparação direta com estudos similares da literatura. Contudo, reconhece-se que essa abordagem pode introduzir variabilidade nas estimativas, sendo recomendada, em estudos futuros, a utilização de validação cruzada, preferencialmente com bloqueio espacial ou temporal.

A avaliação do desempenho considerou a acurácia e a curva AUC-ROC (*Receiver Operating Characteristic*), garantindo um balanço entre precisão e sensibilidade. Para interpretação do modelo e identificação dos fatores mais relevantes, foram gerados gráficos de importância de variáveis com base nos valores de ganho e aplicados os valores da SHAP (*Shapley Additive Explanations*) para a compreensão dos efeitos marginais de cada variável.

Essa abordagem permitiu estimar a probabilidade de ocorrência de acidentes fatais em diferentes segmentos rodoviários. Além disso, possibilitou identificar os principais preditores do risco de fatalidade, destacando-se a natureza do acidente, o envolvimento entre motocicleta e caminhão, a localização

geográfica (LAT/LONG) e fatores temporais, como o sábado.

Os principais hiperparâmetros utilizados no modelo foram: *eta* = 0,1; *max_depth* = 6; *nrounds* = 100; *subsample* = 0,8; *colsample_bytree* = 0,8; *objective = binary:logistic*; *eval_metric = auc*. A escolha desses parâmetros baseou-se em testes empíricos e recomendações da literatura, buscando o equilíbrio entre desempenho preditivo e controle de *overfitting*.

A interpretação utilizou SHAP, que decompõe a predição em contribuições aditivas por variável (valores de Shapley), permitindo analisar a importância global e os efeitos locais (Lundberg; Lee, 2017).

Cabe destacar que a inclusão das coordenadas geográficas (latitude e longitude) como variáveis explicativas pode introduzir uma sobreposição de informação espacial, uma vez que essas variáveis podem refletir padrões espaciais já presentes na variável resposta. Neste estudo, optou-se por manter essas variáveis com o objetivo de captar efeitos espaciais não observados diretamente, funcionando como proxies de características do ambiente viário. No entanto, os resultados associados a essas variáveis devem ser interpretados com cautela, não sendo considerados como relações causais, mas sim como indicativos de dependência espacial residual.

4. RESULTADOS

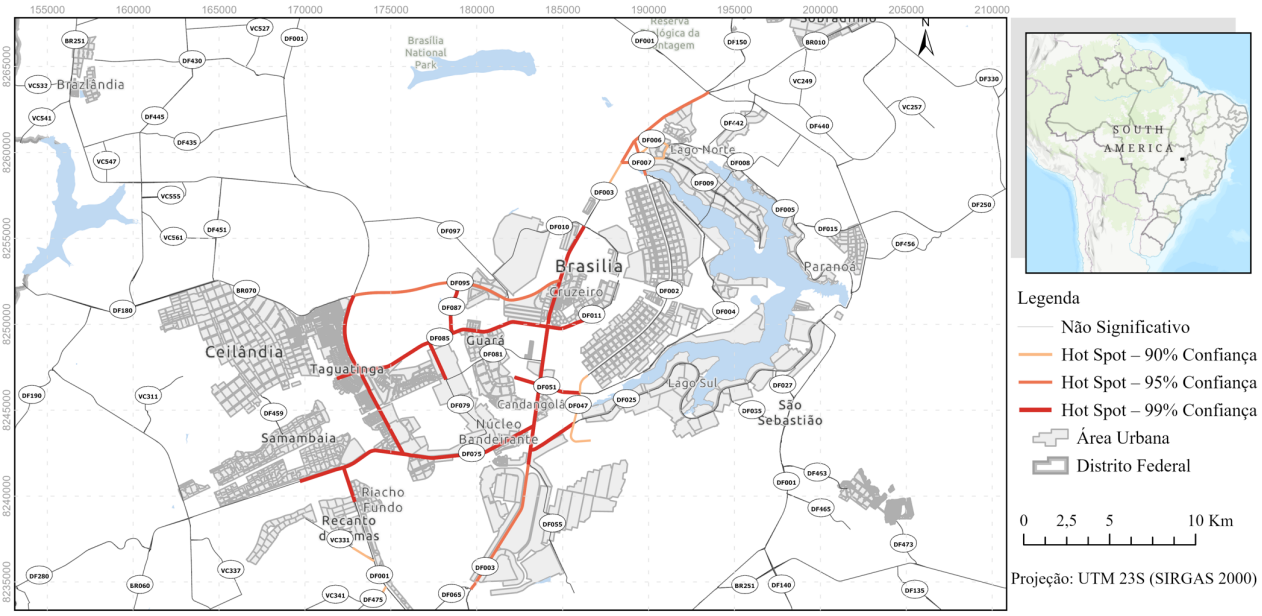
Entre 2014 e 2023, foram registrados 9.055 acidentes envolvendo motociclistas no SRDF, dos quais 439 resultaram em óbito e 8.616 em vítimas não fatais. Esses totais referem-se aos registros geocodificados e validados utilizados nas análises subsequentes.

A aplicação da técnica de Hot Spot Analysis (Getis-Ord Gi*) permitiu identificar padrões estatisticamente significativos de concentração espacial de acidentes envolvendo motociclistas no SRDF (Figura 2). Essa abordagem possibilitou diferenciar trechos com incidência elevada (hot spots) daqueles com ocorrência reduzida (cold spots), considerando o contexto geográfico e a distribuição espacial dos eventos. O método, ao incorporar a autocorrelação espacial, evidencia áreas onde os valores observados não se distribuem aleatoriamente, mas se agrupam de forma consistente, refletindo a presença de fatores locais que potencializam ou atenuam o risco de acidentes.

A análise revelou hot spots com alta significância estatística, distribuídos principalmente em rodovias estruturais que conectam o centro de Brasília às regiões administrativas e cidades do Entorno. Entre os trechos destacados, em ordem numérica, encontram-se: DF-001, DF-003, DF-075, DF-085, e DF-095. Esses segmentos apresentam agrupamentos contínuos de registros, formando corredores críticos dentro da malha rodoviária. As áreas não destacadas no mapa correspondem a trechos sem significância estatística, enquanto algumas regiões periféricas apresentam valores reduzidos de ocorrência, caracterizando cold spots. A delimitação espacial obtida evidencia que os agrupamentos mais intensos se concentram na porção centro-sudeste do território, abrangendo vias de alta conectividade no fluxo diário do Distrito Federal.

Para detalhar os corredores críticos identificados na Figura 2, a Tabela 1 apresenta, por rodovia, os trechos classificados como hot spots, o maior nível de significância observado, a extensão total (km) e a taxa média de acidentes por quilômetro. Essa síntese complementa o mapa e facilita a priorização das vias com maior intensidade e extensão de risco.

Figura 2 — Hot spots (Gi*) de acidentes envolvendo motociclistas no SRDF, 2014–2023.



Fonte: Autores.

Tabela 1 - Trechos de concentração significativa de acidentes com motociclistas (Getis-Ord Gi*) no SRDF, 2014–2023.

Rodovia	Extensão total (km)	Taxa média (acidentes/km)	Maior nível de significância	Níveis presentes
DF-001	16,05	68,68	99%	99%
DF-003	31,16	45,37	99%	99%, 95%, 90%
DF-005	0,79	15,18	90%	90%
DF-006	2,25	2,66	90%	90%
DF-007	2,12	23,62	95%	95%
DF-009	2,53	15,01	95%	95%, 90%
DF-011	2,24	50,96	99%	99%
DF-025	2,98	26,81	99%	99%
DF-047	5,1	17,25	90%	90%
DF-051	3,94	21,59	99%	99%
DF-075	8,02	85,71	99%	99%
DF-079	2,37	18,17	99%	99%
DF-085	13,01	53,49	99%	99%
DF-087	3,03	18,16	99%	99%
DF-095	12,54	35,97	95%	95%
DF-475	1,51	9,96	90%	90%

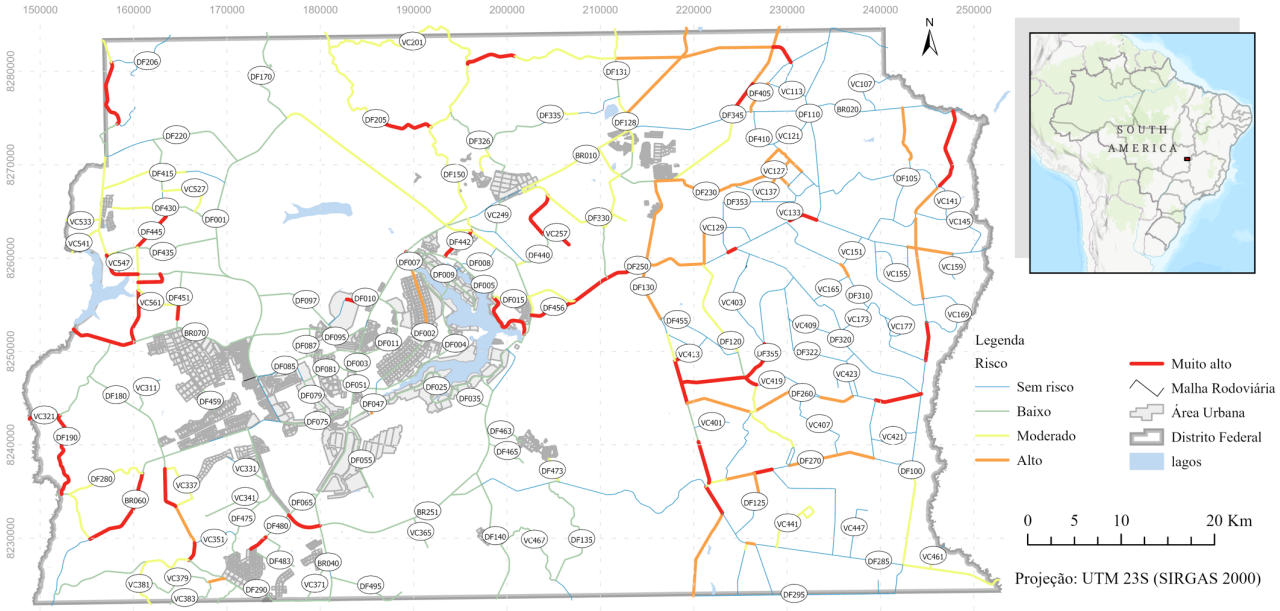
Fonte: Autores.

No conjunto da rede, os trechos classificados como hot spots somam 113,78 km (46 segmentos). Pela significância estatística, prevalecem áreas de 99% (68,69 km; 60,4% do total), seguidas de 95% (30,69 km; 27,0%) e 90% (14,40 km; 12,7%). Em termos de cobertura por via, a Tabela 1 indica 18 rodovias com trechos críticos; em 10 delas, o maior nível identificado foi 99%; em 3, o maior nível foi 95%; e, em 5, foi 90%. Esses padrões espaciais estão representados na Figura 2, na forma de corredores contínuos de maior intensidade.

Por rodovia, os maiores comprimentos de hot spots concentram-se na DF-003 (31,16 km; 27,4% do total; 99% predominante, com níveis de 99%, 95% e 90% presentes), DF-001 (16,05 km; 14,1%; 99%), DF-085 (13,01 km; 11,4%; 99%), DF-095 (12,54 km; 11,0%; 95%) e DF-075 (8,02 km; 7,0%; 99%). Considerando a taxa média de acidentes por km (ponderada pelo comprimento), destacam-se a DF-075 (85,71 acidentes/km), a DF-001 (68,68 acidentes/km) e a DF-085 (53,49 acidentes/km), enquanto a DF-003 apresenta 45,37 acidentes/km. No cruzamento atual, a DF-002 não registrou trechos classificados como hot spot. Esses resultados convergem com a Figura 2, na qual os eixos DF-001, DF-003, DF-075 e DF-085 aparecem como os principais corredores críticos em extensão e intensidade de significância.

Como complemento ao diagnóstico espacial, a Figura 3 apresenta o Mapa de Risco derivado do XGBoost para acidentes com motociclistas no SRDF, classificado em cinco níveis (muito baixo → muito alto). A performance do classificador está sintetizada na Tabela 3 (matriz de confusão) e na Tabela 4 (métricas globais; AUC-ROC = 0,8843), enquanto os principais preditores, segundo o ganho, são listados na Tabela 2, destacando natureza do acidente, interação motocicleta × caminhão, a localização e o dia da semana.

Figura 3 — Mapa de risco de fatalidade em acidentes com motociclistas no SRDF.



Fonte: Autores.

O Mapa de Risco representa a propensão à fatalidade, condicional à ocorrência do acidente, e não o volume de eventos. Assim, trechos rurais e de menor fluxo podem figurar como alto/muito alto: velocidades operacionais elevadas, menor iluminação, acostamentos estreitos e maior tempo de resposta de atendimento aumentam a chance de óbito caso o evento ocorra. Em contraste, nos corredores estruturantes (DF-085/EPTG, DF-075/EPNB, DF-095/EPCL, DF-003/EPIA), predomina risco baixo/moderado, com picos localizados em entroncamentos, retornos e acessos à rodovia DF-001, bem como às rodovias federais que cortam o Distrito Federal. Esse padrão é pontual e descontínuo, concentrado onde a complexidade operacional é maior, e é coerente com os preditores mais influentes (Tabela 2), notadamente a natureza do acidente, a interação motocicleta × caminhão, as coordenadas (LAT/LONG) e o componente semanal (sábado).

Tabela 2 - Importância das variáveis

Posição	Variável	Ganho
1	Ano do registro	0,309
2	Natureza – Colisão frontal	0,093
3	Natureza – Choque com objeto fixo	0,083
4	Localização – Coordenadas (LAT/LONG)	0,076
5	Envolvimento – Motocicleta × Caminhão	0,040
6	Natureza – Colisão traseira	0,036
7	Natureza – Colisão lateral	0,032
8	Dia da semana – Sábado	0,031
9	Natureza – Queda de veículo	0,028

Fonte: Os autores.

As importâncias foram estimadas pelo ganho do XGBoost (redução média da função-objetivo nos nós em que cada variável participa, acumulada ao longo das árvores). Os nove preditores listados concentram 72,8% do ganho total. O ano do registro apresentou a maior contribuição (ganho = 0,309; ≈42%), seguido por categorias de natureza do acidente — colisão frontal (0,093), choque com objeto fixo (0,083), colisão traseira (0,036), colisão lateral (0,032) e queda de veículo (0,028) —, pelo envolvimento motocicleta × caminhão (0,040), pela localização – coordenadas (LAT/LONG) (agregado = 0,076; ≈10%) e por dia da semana – sábado (0,031). A proeminência de ANO é compatível com tendência temporal da série; as coordenadas capturam autocorrelação espacial remanescente; e o bloco de natureza aponta mecanismos lesivos de maior severidade. Ressalte-se que "ganho" é uma métrica específica do algoritmo e não implica causalidade; além disso, preditores temporais/espaciais podem introduzir vazamento temporal/espacial e inflar a discriminação sob partições aleatórias.

Do ponto de vista classificatório, o modelo obteve bom poder discriminante, com Área sob a Curva da Característica de Operação do Receptor (AUC-ROC) = 0,8843. Na amostra de teste, a matriz

de confusão (Tabela 3) apresentou Verdadeiros Negativos (TN) = 1.724, Falsos Positivos (FP) = 9, Falsos Negativos (FN) = 43 e Verdadeiros Positivos (TP) = 35, resultando em acurácia = 0,9713 (IC95%: 0,9625–0,9785), Coeficiente Kappa (κ) = 0,560 e Acurácia Balanceada = 0,722; observou-se Especificidade elevada para a classe Não Fatal (0,995) e Sensibilidade moderada para a classe Fatal (0,449).

As métricas globais detalhadas na Tabela 4 consolidam o desempenho — Área sob a Curva (AUC), acurácia, Coeficiente Kappa (κ), Sensibilidade, Especificidade, Valor Preditivo Positivo (PPV), Valor Preditivo Negativo (NPV) e Acurácia Balanceada —, oferecendo um panorama sintético para comparação com ajustes futuros de limiar e balanceamento.

Tabela 3 – Dados das manobras registradas

	Referência: Não Fatal	Referência: Fatal
Previsto: Não Fatal	TN = 1.724	FN = 43
Previsto: Fatal	FP = 9	TP = 35

Fonte: Os autores.

Tabela 4 - Métricas de desempenho no conjunto de teste.

Métrica	Valor
AUC-ROC	0,8843
Acurácia	0,9713
IC95% (Acurácia)	0,9625 – 0,9785
Kappa	0,560
Sensibilidade (Fatal)	0,449
Especificidade (Não Fatal)	0,995
PPV (Fatal)	0,795
NPV (Não Fatal)	0,976
Acurácia balanceada	0,722
Total (N)	1.811

Fonte: Os autores.

As métricas reportadas avaliam o desempenho sob diferentes ângulos: AUC-ROC mede o poder discriminante global do modelo (probabilidade de pontuar um caso “fatal” acima de um “não fatal”, independentemente do limiar); a acurácia é a proporção total de acertos; a sensibilidade indica a fração de casos fatais corretamente identificados; a especificidade, a fração de não fatais corretamente descartados; o PPV é a probabilidade de um previsto “fatal” ser, de fato, fatal; o NPV, de um previsto “não fatal” ser realmente não fatal; o coeficiente Kappa expressa o acordo além do acaso (útil em bases desbalanceadas); e a acurácia balanceada corresponde à média entre sensibilidade e especificidade,

mitigando o efeito do desbalanceamento de classes. Como a avaliação utilizou uma única partição treino–teste, as estimativas estão sujeitas a maior variabilidade; recomenda-se empregar validação cruzada e/ou *early stopping* em trabalhos futuros para reforçar a robustez dos resultados.

5. DISCUSSÃO

A análise espacial por meio do método Getis-Ord Gi* evidenciou a formação de corredores críticos de acidentes envolvendo motociclistas no Sistema Rodoviário do Distrito Federal, com destaque para rodovias estruturais como DF-001, DF-003, DF-075, DF-085 e DF-095. Esse padrão confirma que a distribuição dos eventos não ocorre de forma aleatória, mas acompanha eixos de elevada conectividade, forte circulação diária e intensa interação entre fluxos urbanos e periurbanos. Em termos aplicados, isso indica que a frequência dos acidentes está fortemente associada à estrutura funcional da rede viária, especialmente em corredores de grande demanda e elevada complexidade operacional.

Esses achados convergem com estudos que demonstram a utilidade das técnicas de análise espacial para identificar áreas críticas e subsidiar intervenções territorialmente orientadas. Trabalhos como os de Tippayanate *et al*. (2024), Haque *et al*. (2010) e Mohammed *et al*. (2023) mostram que a distribuição dos acidentes tende a refletir características locacionais, padrões de conectividade e condições de operação do sistema viário. No caso do Distrito Federal, a concentração dos hot spots em rodovias estruturais sugere que a combinação entre alto fluxo, conflitos de tráfego e articulação metropolitana constitui elemento central para compreender a concentração dos eventos envolvendo motociclistas.

Tomados em conjunto, os resultados não indicam uma sobreposição ampla entre “onde mais ocorrem acidentes” e “onde é maior a chance de óbito caso o evento ocorra”. A análise de hot spot revela corredores urbanos de alta frequência, ao passo que o mapa preditivo derivado do XGBoost destaca, sobretudo, segmentos periurbanos e rurais, nos quais a probabilidade condicional de fatalidade tende a ser maior. Esse contraste é relevante porque evidencia duas dimensões distintas do risco viário: a frequência dos eventos e a severidade esperada. Assim, áreas com grande número de ocorrências não coincidem, necessariamente, com aquelas onde o desfecho fatal é mais provável.

Essa distinção é coerente com a literatura recente sobre segurança viária orientada por risco. Estudos alinhados ao paradigma do Safe System indicam que ambientes com velocidades operacionais mais elevadas, menor iluminação, menor proteção lateral e tempos de resposta mais longos tendem a aumentar a severidade dos acidentes, mesmo quando o volume de eventos é relativamente menor. Nesse sentido, os resultados do presente estudo sugerem que, no SRDF, corredores urbanos demandam ações voltadas à redução da frequência dos acidentes, enquanto trechos periurbanos e rurais requerem intervenções prioritariamente direcionadas à mitigação da severidade.

No âmbito da modelagem preditiva, os resultados do XGBoost indicaram que colisões frontais, choques com objeto fixo, colisões laterais e traseiras, além da interação entre motocicletas e caminhões, estão entre os principais fatores associados ao aumento da probabilidade de fatalidade. Esse resultado é compatível com evidências internacionais que apontam maior severidade em eventos com maior transferência de energia, maior exposição corporal do motociclista e

interação com veículos de maior porte. Estudos como os de Agyemang, Adanu e Jones (2021), Wisutwattanasak *et al*. (2024) e Yang *et al*. (2022) reforçam que a severidade dos acidentes com motociclistas depende não apenas da ocorrência em si, mas do contexto operacional, do tipo de conflito e das condições do ambiente viário.

A relevância de variáveis temporais e operacionais, como sábado e natureza do acidente, também sugere que o risco não é apenas espacial, mas resulta da combinação entre localização, dinâmica de circulação e contexto de uso da via. Esse ponto é importante porque reforça a necessidade de políticas intersetoriais que articulem engenharia, fiscalização e gestão da velocidade com recortes territoriais e temporais específicos. Em outras palavras, a utilidade do modelo não está apenas em predizer eventos severos, mas em oferecer evidências para intervenções mais seletivas e territorialmente calibradas.

Do ponto de vista do desempenho preditivo, o modelo apresentou AUC-ROC de 0,8843 e acurácia elevada, indicando boa capacidade discriminatória. Ainda assim, a sensibilidade moderada revela que parte dos casos fatais não foi capturada pelo classificador, o que recomenda cautela na interpretação operacional do modelo. Em contextos de segurança viária, essa limitação é particularmente importante, pois a utilidade prática de um modelo não depende apenas da boa performance global, mas também da capacidade de identificar eventos raros e de maior gravidade.

Algumas limitações devem ser destacadas. Em primeiro lugar, a utilização de uma única partição treino–teste pode aumentar a variabilidade das estimativas, de modo que aplicações futuras podem se beneficiar de validação cruzada e, idealmente, de estratégias com bloqueio espacial ou temporal. Em segundo lugar, a inclusão de latitude e longitude como variáveis explicativas, embora útil para capturar dependência espacial residual, pode introduzir sobreposição de informação espacial, devendo seus efeitos ser interpretados como proxies locacionais e não como relações causais. Em terceiro lugar, a ausência de variáveis diretamente relacionadas à geometria viária, às velocidades regulamentadas e aos volumes de tráfego limita a capacidade explicativa do modelo, ainda que parte desses efeitos possa ter sido parcialmente capturada por variáveis locacionais e operacionais.

Mesmo com essas restrições, os resultados demonstram que a combinação entre análise espacial e modelagem preditiva oferece ganhos analíticos importantes. Enquanto o Getis-Ord Gi* permite localizar corredores com maior concentração de acidentes, o XGBoost acrescenta uma leitura sobre a severidade esperada dos eventos. Essa abordagem integrada contribui para uma interpretação mais consistente do risco viário e amplia o potencial de aplicação dos resultados no planejamento da segurança viária no Distrito Federal.

6. CONCLUSÃO

Este estudo demonstrou que a combinação entre análise espacial (Getis-Ord Gi*) e modelagem preditiva (XGBoost) constitui uma estratégia analítica útil para compreender a acidentalidade envolvendo motociclistas no Sistema Rodoviário do Distrito Federal. Os resultados confirmaram a existência de corredores com forte concentração de acidentes, sobretudo em rodovias estruturais de elevada conectividade, ao mesmo tempo em que revelaram que a maior probabilidade condicional de fatalidade tende a se distribuir de forma distinta, com destaque para segmentos periurbanos e rurais.

Assim, o principal achado da pesquisa foi evidenciar que frequência de acidentes e risco de fatalidade não correspondem à mesma dimensão analítica. Enquanto a análise espacial orienta a identificação de áreas com maior volume de ocorrências, o modelo preditivo permite reconhecer trechos onde a severidade esperada é mais elevada, ainda que a quantidade de eventos seja menor. Essa distinção reforça a necessidade de estratégias diferenciadas de intervenção no território.

Do ponto de vista aplicado, os resultados sugerem que corredores urbanos mais congestionados e com maior concentração de acidentes demandam medidas voltadas à redução da frequência dos eventos, como reorganização de fluxos, fiscalização e melhorias operacionais. Já os segmentos com maior probabilidade de desfecho fatal requerem ações direcionadas à mitigação da severidade, especialmente por meio da gestão da velocidade, do reforço da segurança lateral, de melhorias de visibilidade e de atenção a conflitos envolvendo veículos de grande porte.

Em termos metodológicos, o estudo contribui ao integrar duas abordagens frequentemente tratadas de forma isolada na literatura: a identificação de clusters espaciais e a predição da severidade dos acidentes. Embora as técnicas utilizadas sejam conhecidas, sua aplicação combinada, com ênfase na distinção entre concentração de eventos e risco condicional de fatalidade, amplia o potencial analítico para o planejamento da segurança viária.

Por fim, recomenda-se que estudos futuros incorporem variáveis mais diretamente relacionadas às características da infraestrutura viária, às velocidades regulamentadas, aos volumes de tráfego e a dados complementares de fiscalização e atendimento. Também se recomenda o uso de estratégias de validação cruzada com bloqueio espacial ou temporal, de modo a reforçar a robustez dos modelos e reduzir possíveis efeitos de dependência espacial residual.

BIBLIOGRAFIA

AGYEMANG, W.; ADANU, E. K.; JONES, S. (2021). Understanding the factors that are associated with motorcycle crash severity in rural and urban areas of Ghana. Journal of Advanced Transportation, **2021**, e6336517. DOI: https://doi.org/10.1155/2021/6336517.

BRASIL. Secretaria Nacional de Trânsito (SENATRAN). (2024). **Frota de Veículos – 2024 (Registro Nacional de Veículos Automotores – RENAVAM)**. Ministério dos Transportes, Brasília, DF.

BRENAC, T.; CLABAUX, N.; PERRIN, C.; VAN ELSLANDE, P. (2006). Motorcyclist conspicuity-related accidents in urban areas: a speed problem? Advances in Transportation Studies – Section A, n. **8**, p. 23–29.

CHAWLA, N. V.; BOWYER, K. W.; HALL, L. O.; KEGELMEYER, W. P. (2002). SMOTE: synthetic minority over-sampling technique. Journal of Artificial Intelligence Research, v. **16**, p. 321–357. DOI: https://doi.org/10.1613/jair.953.

CHEN, F.; ZHANG, Q.; WANG, Z.; *et al*. (2025). Traffic accident severity prediction based on an enhanced MSCPO-XGBoost hybrid model. Scientific Reports, v. **15**, art. 25729. DOI: https://doi.org/10.1038/s41598-025-00797-7.

DISTRITO FEDERAL. Departamento de Trânsito do Distrito Federal (DETRAN-DF). (2024). **Frota de veículos registrados no DF em circulação — 2º trimestre de 2024**. Detran-DF, Brasília, DF.

EUROPEAN COMMISSION. (2023). **Road Safety Thematic Report: Safe System Approach**. European Commission, Brussels.

GETIS, A.; ORD, J. K. (1992). The analysis of spatial association by use of distance statistics. Geographical Analysis, v. **24**, n. **3**, p. 189–206. DOI: https://doi.org/10.1111/j.1538-4632.1992.tb00261.x.

HAQUE, M. M.; CHIN, H. C.; HUANG, H. (2010). Applying Bayesian hierarchical models to examine motorcycle crashes at signalized intersections. Accident Analysis & Prevention, v. **42**, n. **1**, p. 203–212. DOI: https://doi.org/10.1016/j.aap.2009.07.022.

JIANG, F.; YUEN, K. K. R.; LEE, E. W. M. (2020). Analysis of motorcycle accidents using association rule mining-based framework with parameter optimization and GIS technology. Journal of Safety Research, v. **75**, p. 292–309. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jsr.2020.09.004.

LUNDBERG, S. M.; LEE, S.-I. (2017). A unified approach to interpreting model predictions. In: **Advances in Neural Information Processing Systems (NeurIPS 2017)**. DOI: https://doi.org/10.48550/arxiv.1705.07874.

MIAO, J.; PAN, Y.; ZHAO, K. (2025). Analysis of the spatiotemporal effects on the severity of motorcycle accidents without helmets and strategies for building sustainable traffic safety. Sustainability, v. **17**, n. **8**, art. 3280. DOI: https://doi.org/10.3390/su17083280.

MOHAMMED, S.; ALKHEREIBI, A. H.; ABULIBDEH, A.; JAWARNEH, R. N.; BALAKRISHNAN, P. (2023). GIS-based spatiotemporal analysis for road traffic crashes: in support of sustainable transportation planning. Transportation Research Interdisciplinary Perspectives, v. **20**, 100836. DOI: https://doi.org/10.1016/j.trip.2023.100836.

OECD/ITF. (2008). **Towards Zero: Ambitious Road Safety Targets and the Safe System Approach**. OECD/ITF, Paris.

PANUMASVIVAT, J.; *et al*. (2024). Unveiling the road to safety: understanding the factors influencing motorcycle accidents among riders in rural Chiang Mai, Thailand. Heliyon, v. **10**, n. **3**, e25698. DOI: https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e25698.

QIAN, R. Y.; WANG, X. (2023). Prediction of road traffic accident severity based on XGBoost-BP neural network. Advances in Transportation Studies, v. **61**, p. 19–36. DOI: https://doi.org/10.53136/97912218091902.

SANTOS JÚNIOR, C. J.; SILVA, J. P.; ROCHA, T. J. M. (2022). Análise da ocorrência de acidentes de trânsito fatais nas capitais do Nordeste do Brasil. Hygeia – Revista Brasileira de Geografia Médica e da Saúde, v. **18**, p. 44–53. DOI: https://doi.org/10.14393/hygeia1858395.

SANTOS, J. P.; GUIMARÃES, P. H.; SILVA, B. A. L.; CAMPANI, A. R.; OLIVEIRA, J. M. V. (2023). DERGeo: geovisualizador de informações geográficas para gestão do Sistema Rodoviário do Distrito Federal. Revista Brasileira de Transportes, v. **3**, n. **1**, p. 62–85. DOI: https://doi.org/10.12660/rbt.v3n1.2023.89030.

SIQUEIRA, J. S.; WERNECK, G. L.; PENA, P. G. L.; FERNANDES, R. C. P. (2025). Trabalho subordinado de entregadores em empresas-plataforma de entrega e acidentes nas ruas: magnitude e fatores associados. Cadernos de Saúde Pública, v. **41**, n. **3**, e00204723. DOI: https://doi.org/10.1590/0102-311xpt204723.

TIPPAYANATE, N.; IMPOOL, T.; SUJAYANONT, P.; MUTTITANON, W.; CHEMIN, Y.; SOM-ARD, J. (2024). A geospatial analysis of motorcycle accident risk factors in Khon Kaen Municipality, Thailand: examining the chain of survival and potential strategies. International Journal of Geoinformatics, v. **20**, n. **9**, p. 71–82. DOI: https://doi.org/10.52939/ijg.v20i9.3547.

WORLD HEALTH ORGANIZATION (WHO). (2023). **Global status report on road safety 2023**. WHO, Geneva.

WISUTWATTANASAK, P.; SE, C.; CHAMPAHOM, T.; *et al*. (2024). Factors affecting single and multivehicle motorcycle crashes: insights from day and night analysis using XGBoost-SHAP algorithm. Big Data and Cognitive Computing, v. **8**, n. **10**, 128. DOI: https://doi.org/10.3390/bdcc8100128.

YANG, Y.; LI, Y.; WANG, J.; *et al*. (2022). Predicting freeway traffic crash severity using XGBoost-Bayesian network model with consideration of features interaction. Journal of Advanced Transportation, v. **2022**, 4257865. DOI: https://doi.org/10.1155/2022/4257865.

ARTICLE 6

URBAN ROAD SAFETY AND MANAGEMENT: SPATIAL PATTERNS AND PREDICTED FATALITY RISKS AMONG MOTORCYCLISTS IN BRAZIL'S FEDERAL DISTRICT ROAD SYSTEM (2014–2023)

Janduhy Pereira dos Santos (DER/DF), Valdir Adilson Steinke, Maurício Theodósio Mattos Marques, Ricardo Sameshima Taba, Andrea Amaziles A. A. de Carvalho Lousada, Bruno Maia Soriano Lousada, Jesus Mauro Vieira de Oliveira e Caroline Ribeiro Chahini

RESUMO

Este artigo investiga a dinâmica espacial e os fatores associados à gravidade de acidentes envolvendo motociclistas no Distrito Federal, com base em dados de acidentes rodoviários (2014–2023). Adota-se um fluxo analítico que combina análise espacial para detecção de áreas críticas (Getis-Ord Gi*), modelagem preditiva por gradient boosting (XGBoost) e balanceamento de classes (SMOTE), com interpretação da importância dos preditores via SHAP. A avaliação baseia-se em partição treino–teste estratificada, priorizando a comparação de desempenho e a leitura substantiva das variáveis. Os achados indicam padrões concentrados no espaço urbano e a relevância de características do evento, do contexto operacional e de aspectos temporais na explicação do risco. As evidências resultantes subsidiam estratégias de segurança viária voltadas à priorização territorial, à fiscalização direcionada e a ações de moderação de velocidade, contribuindo para o planejamento intersetorial e para a redução de desfechos graves entre motociclistas.

Palavras-chave: acidentes de trânsito; motocicletas; análise espacial

ABSTRACT

This study investigates the spatial dynamics and factors associated with the severity of motorcycle-involved road crashes in Brazil's Federal District, using crash records from 2014 to 2023. An analytical workflow is adopted that combines spatial statistics to detect critical areas (Getis-Ord Gi*), predictive modeling via gradient boosting (XGBoost), and class imbalance handling with SMOTE, with predictor importance interpreted using SHAP. Model evaluation relies on a stratified train–test split, prioritizing comparative performance assessment and the substantive interpretation of predictors. The results highlight the relevance of event-specific attributes, operational context, and temporal factors in explaining risk. The resulting evidence informs road safety strategies focused on geographic prioritization, targeted enforcement, and speed management measures, supporting cross-sector planning and the reduction of severe outcomes among motorcyclists.

Keywords: Road traffic accidents; Motorcycles; Spatial analysis.

1. INTRODUCTION

During the past few decades, rapid urban growth in Brazil has triggered significant transformations in territorial dynamics and mobility patterns, especially in major metropolises. Associated with inadequate and unappealing public transport systems, spreading urban sprawl has fuelled the expansion of motor vehicle fleets, especially motorcycles. This mode now plays a strategic role in urban mobility within this context, as either an effective way of avoiding traffic jams or as a tool for entering the labour market, especially through activities running on digital platforms.

In Brazil's Federal District, this dynamic has intensified significantly, driven by economic and structural factors. From 2015 onwards, an economic crisis and the reconfiguration of the labour market fuelled the growth of casual work and unregistered jobs, many dependent on motorcycles. This process was intensified by the COVID-19 pandemic, with soaring demands for individual transport and delivery services. The outcomes were a significant expansion of the motorcycle fleet, accompanied by an upsurge in traffic accidents involving this group, ranked among the most vulnerable road system users (SENATRAN, 2024; DETRAN-DF, 2024).

From the road safety standpoint, recent literature is moving away from approaches focused only on identifying critical points, instead including systemic viewpoints based on risk management, such as the Safe System paradigm. This approach acknowledges user vulnerability and the inevitability of human error, assigning system managers responsibilities for structuring roads, regulating speeds, and organising traffic, in order to minimise the occurrence of serious accidents and fatal injuries (OECD/ITF, 2008; WHO, 2023).

In this context, spatial analyses and predictive modelling have firmed up their status as vital tools for understanding accidentality, not only identifying territorial patterns, but also estimating occurrence probabilities for serious outcomes. Recent studies have deployed techniques such as spatial statistics and machine learning algorithms to investigate factors associated with the accident severity, highlighting the relevance of variables related to road environments, user behaviours, and the transport system operating conditions.

However, despite this methodological progress, there are still important gaps in the literature, especially for integrating traditional spatial analyses that identify areas where events are concentrated, and predictive approaches able to estimate the conditional fatality risks. In many studies, these aspects are addressed individually, which hampers an integrated understanding of these phenomena, with less potential for applying these findings to road safety planning.

This is the context within which this study strives to (i) identify spatial patterns for motorcycle accidents in the Federal District Highway System (2014–2023); and (ii) develop a predictive fatality risk model based on machine learning techniques, for the purpose of identifying critical factors associated with event severity.

The main contribution of this paper is the integration between spatial analyses of accident concentration (Getis-Ord Gi*) and predictive modelling of conditional fatality risks (XGBoost). This allows two aspects to be distinguished empirically, which are frequently confounded in the literature: (i) where accidents are more frequent; and (ii) where the probabilities of death are higher. This combined approach ensures more accurate road risk estimates, thus helping prioritise customised interventions in this field.

Moreover, this study takes a further step forward by applying this methodological integration at the road network scale, including operating and time related variables while exploring model interpretation techniques through the SHapley Additive exPlanations (SHAP) game-theory-based framework, for a better understanding of mechanisms associated with accident severity. Although these techniques are widely acknowledged in the literature, their joint application constitutes a relevant analytical advance in the road safety field, focused on the distinction between absolute risk and conditional risk.

Providing input for mobility planning and management, these findings help steer traffic engineering, oversight, and education actions, aligned with evidence-driven approaches pursuing reductions in deaths and serious injuries.

2. LITERATURE REVIEW

Over the past thirty years, motorcycle uses and purposes have changed significantly. Once preferred for recreation and individual commuting, these vehicles were of little use for work purposes. However, spreading metropolitanisation processes in large towns and cities, together with rising demands for outsourced services and fast deliveries, have fuelled significant growth for motorcycle fleets in many countries.

In the transport and road safety fields, contemporary discussions stress that lowering mortality requires a combination of risk management, governance, and oversight with integrated interventions in infrastructure, safe speeds, vehicles, enforcement, and post-accident care. Summarised reports note that global traffic death burdens remain high, despite recent dips, underscoring the need for evidence-based strategies with performance and risk indicators, looking not only at absolute event figures (WHO, 2023).

Despite growing consensus in the literature on the need for systemic on risk-based management approaches, it is nevertheless clear that many studies still focus on identifying aggregate accident occurrence patterns, without explicitly addressing the distinction between event frequency and the probabilities of serious outcomes. This limitation weakens their potential for applying these findings to planning better targeted interventions, especially in contexts where exposure and severity are not spatially coincident.

For vulnerable users such as motorcyclists, this agenda is particularly important, as severity tends to rise in parallel with exposure to high speeds and conflicts in road environments not designed to absorb impacts. Location-based predictive studies must be grounded in risk management logic: where infrastructures and operations

may be redesigned to reduce collision energy and segregate conflicts, aligned with Safe System principles (OECD/ITF, 2008; European Commission, 2023).

Similarly, Santos Júnior et al. (2022) describe fatal traffic accidents as a complex and challenging problem for public authorities. The authors highlight risky behaviours in urban traffic and the high social and economic costs of fatal traffic accidents, advocating intersectoral actions and better oversight. These losses include overburdening healthcare and social security services, reflecting high social and economic costs associated with motorcycle accidents.

This concern for ensuring safe conditions for motorcyclists encompasses all other mobility sectors. In this context, Brenac et al. (2006) highlight the importance of motorcyclist visibility on roads, emphasising that difficulties in visually perceiving nearby objects or people is a recurrent factor in urban accidents.

This concern extends to rural roads, where motorcycle use absorbs a variety of functions beyond merely transporting riders. When examining motorcycle accidents in rural Ghana, Agyemang, Adanu, and Jones (2021) note that these events are often overlooked by public policies. These authors point out that the poor road conditions, limited access to emergency services, and risky radar behaviours directly affect the severity of injuries recorded in these contexts.

The use of analytical instruments, such as geoinformation tools, has become essential for the preparation and implementation of public policies pursuing road safety, identifying critical areas and proposing effective interventions designed to reduce traffic accidents. Studies such as those by Tippayanate et al. (2024) and Haque et al. (2010) demonstrate the potential of spatial analysis techniques for identifying territorial motorcycle accident patterns, thus helping steer preventive actions. Overall, these studies confirm the effectiveness of spatial analysis techniques in identifying critical areas. However, most approaches remain focused on detecting occurrence clusters, with little progress in event-conditional risk modelling. This constraint may lead to prioritising areas with high accident rates, but not necessarily higher fatality probabilities. Furthermore, Miao et al. (2025) use spatio-temporal models applied to China to demonstrate that helmet absence is closely linked to accident severity, underscoring the importance of georeferenced data for evidence-based decisions.

The application of geoinformation techniques has proven strategic for drawing up public policies focussed on mobility and road safety. Studies such as that by Jiang, Yuen and Lee (2020) demonstrate how the integration between association rule mining and spatial analysis through Geographic Information Systems (GIS), allows the identification of critical factors associated with motorcycle accidents, while also mapping areas where these factors converge. International studies deploying the XGBoost technique for road accident severity predictions, such as analyses by Wisutwattanasak et al. (2024) on motorcycle accidents in Thailand; Chen et al. (2025) on MSCPO-XGBoost optimisation in China; Qian and Wang (2023) on British accidents; and Yang et al. (2022) on US highways, confirm the robustness of this

technique for capturing nonlinear factors and interpreting contextual variables in road safety studies. Despite progress in the use of machine learning algorithms to predict accident severity, it is noted that these approaches often fail to explicitly include the spatial aspects of these phenomena, treating location mainly as an additional explanatory variable, without fully exploring its spatial structure. Moreover, there is little integration between predictive models and exploratory spatial analyses, limiting joint understandings of territorial patterns and risk mechanisms.

Consequently, as shown by Panumasvivat et al. (2024), decision-making in public mobility policies relies on geospatial techniques as essential input for identifying risk factors, not only for motorcyclists, but also for other transport system users, in both urban and rural areas. These tools pave the way for steps such as traffic engineering interventions, more intensive oversight and inspections, road infrastructure upgrades, and awareness campaigns run at specific times and places.

By generating predictive maps and high-incidence clusters with statistical bases, this study presents suggestions for interventions in infrastructure, oversight, and educational campaigns. No longer merely high-tech toys, geospatial techniques firm up their status as ancillary tools for pursuing territorial justice and preventing accidents. Although several studies underline the relevance of variables related to road geometry, speed limits, and traffic volumes for explaining accident severity, the availability and standardisation of these data are still challenging in many institutional contexts. This constraint has prompted researchers to use spatial and operational data, such as geographic location and event characteristics, as a way to partially capture these effects.

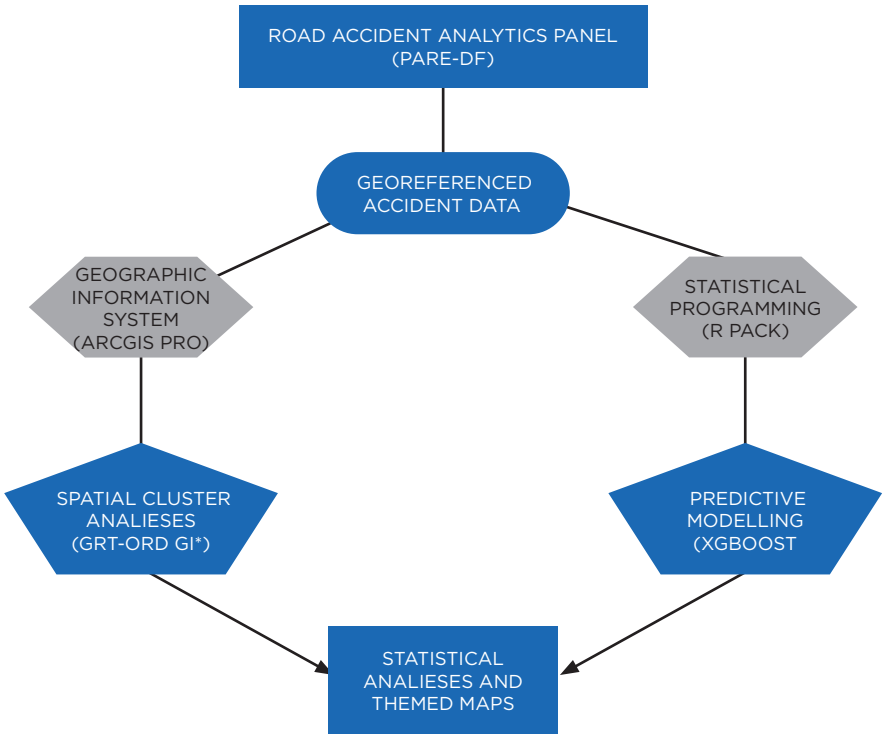
3. METHODOLOGY

This study adopts a quantitative approach, using spatial analysis methods to identify distribution patterns and factors associated with traffic motorcycle accidents in the Federal District Highway System (FDHS).

This study is consequently structured into three interconnected sections (Figure 1), as shown in the methodology flowchart: (i) database organisation, cleaning and standardisation, with record geocoding and integration into the FDHS road network; (ii) spatial analysis using the Hot Spot Analysis method (Getis-Ord Gi*) to identify critical zones (hot spots) and low incidence (cold spots) for motorcycle accidents; and (iii) predictive modelling using the XGBoost algorithm to identify critical factors that ramp up fatality probabilities.

The integration of these steps produced statistical analyses and thematic maps showing accident occurrence patterns, pinpointing significant motorcycle accident clusters, and estimating risk probabilities for different road segments.

Figure 1 – Methodological flowchart.



Source: Authors.

3.1. Data Organisation and Processing

The records used in this analysis were extracted from the DERGeo geoviewer (Santos et al., 2023), a platform developed by the Federal District Highway Department (DER-DF). This provides georeferenced information on accidents in the road network under its jurisdiction, through the Federal District Road Accident Analytics Panel (PARE-DF) module. This tool offers access to a structured spatial base that handled the statistical and geoinformation techniques throughout this study.

The analysed dataset encompasses 9,055 records of motorcycle accidents in the FDHS between 2014 and 2023, georeferenced in UTM coordinates (spindle 23S, Datum SIRGAS 2000). These entries include detailed information, such as occurrence dates, accident types, and vehicle categories involved, in addition to the geolocation of each event.

Prior to these spatial and statistical analyses, this database was run through a pre-processing procedure, using Microsoft Excel software to prepare and structure these records. These steps involved: identifying and eliminating duplicates and inconsistencies, standardising categorical variables (such as accident types, days of the week, and vehicle categories), converting date and time entries into formats readable by geographic information systems, and validating geographic coordinates. This procedure ensured the semantic consistency and syntactic integrity of the data, for subsequent import and processing in a geospatial environment through the ArcGIS Pro software.

3.2. Spatial and predictive analysis

This methodological stage combines spatial analysis techniques with machine learning methods, designed for a deeper understanding of motorcycle accident risk patterns in the Federal District Highway System.

Initially, the Hot Spot Analysis (Getis-Ord Gi*) technique was applied through the ArcGIS Pro 3.5.1 software, identifying statistically significant clusters with high and low event concentrations. Classified as a spatial exploratory analysis, this stage identifies accident frequency occurrence patterns in the road network.

Next, a predictive model was developed using the XGBoost algorithm, implemented in the R environment (version 4.3.2) to estimate the probabilities of deaths resulting from these accidents. Unlike exploratory spatial analyses, this approach includes an explanatory and prognostic aspect that identifies factors associated with event severity.

The combined use of these two approaches analytically distinguishes two complementary aspects: (i) spatial accident clusters; and (ii) conditional fatality risks, leading to more comprehensive road safety interpretations.

In this study, spatiality was treated in a complementary manner: through exploratory spatial analysis of accident clusters (Getis-Ord Gi*) on the one hand, and on the other by including geographic coordinates as locational proxies in the predictive model, together with time, operating and other related variables.

3.2.1. Getis-Ord Gi Algorithm*

Clusters were identified through the Hot Spot Analysis method (Getis-Ord Gi*), which estimates local spatial associations based on neighbourhood matrixes and spatial weights, pinpointing high and low value clusters with statistical significance (Getis; Ord, 1992).

A hot spot is an area or location with a cluster of accidents within an identifiable boundary. The main ways of estimating accident clusters include georeferenced traffic accident analyses and cluster mapping using the Getis-Ord Gi* functions.

Local spatial association statistics are given by:

$$G_i^* = \frac{\sum_j w_{ij} x_j - \bar{X} \sum_j w_{ij}}{S \sqrt{\frac{n \sum_j w_{ij}^2 - \left(\sum_j w_{ij}\right)^2}{n-1}}} \quad (1)$$

Where:

$Gi*$ is the index value for location i.
xj is the value of the attribute in location j.
wi, j is the spatial weight between the i and j locations.

X is the average of the attribute values.
S is the standard deviation of the attribute values.
n is the total number of locations.

This method assesses spatial event cluster intensities through values attributed to each feature and its immediate neighbours, identifying statistically significant groupings of frequent occurrences (hot spots) and few occurrences (cold spots).

Spatial neighbourhoods were defined by a distance criterion of 1,500 metres. The selection of this parameter was based on preliminary spatial autocorrelation tests, Global Moran's Index (Global Moran's I),

and a connectivity analysis of the Federal District Highway System, using the average scale of interactions between urban and peri-urban road segments. Shorter distances resulted in excessive cluster fragmentation, while longer distances tended to dilute significant local patterns.

A fixed-distance spatial weight matrix was used to ensure comparability among features with different neighbour headcounts. The adopted significance level was 95% ($p < 0.05$) with interpretations based on z-scores and p-values.

Calculations were handled entirely through the ArcGIS Pro software, using a Hot Spot Analysis tool (*Getis-Ord Gi**) to classify the findings into five categories (Very Low, Low, Neutral, High, and Very High).

3.2.2. Predictive modelling with xgboost

For the predictive stage of this study, the Extreme Gradient Boosting (XGBoost) algorithm was used. Belonging to the ensemble learning methods class, specifically the boosting technique, this algorithm sequentially constructs decision tree sets (weak learners), where each new tree is adjusted to correct the errors of its predecessors, optimising objective functions through descending gradients (CHEN et al., 2025).

Predictive modelling was implemented in the R environment (version 4.3.2) through the XGBoost package, while the exploratory spatial analysis steps were run on ArcGIS Pro software, version 3.5.1. This separation reflects the complementary nature of these approaches: the GIS environment for spatial analyses and the statistical environment for predictive modelling.

XGBoost is particularly effective for binary classification tasks, such as that adopted in this study – predicting the occurrence of fatal (1) or non-fatal (0) accidents – due to its ability to model nonlinear relationships, handle unbalanced data, and provide integrated regularisation mechanisms that lower overfitting risks.

The general objective function of XGBoost may be expressed as follows:

Where:

ℓ is the loss function;
ŷi^(t) is the t stage prediction;
Ω(ft) I is the regularisation term;
γ is the complexity cost per tree leaf;
T is the number of leaves;
λ is the L2 regularisation coefficient;
w is the tree weight vector.

$$\mathcal{L}^{(t)} = \Sigma_{i=1}^{n} \ell \left(y_i, \hat{y}_i^{(t-1)} + f_t(x_i) \right) + \Omega(f_t), \Omega(f) = \gamma \cdot T + (\lambda/2) \cdot \Sigma_{j=1}^{T} w_j^2 \quad (2)$$

The prediction for the xi instance after t trees is given by:

$$\hat{y}_i = \Sigma_{k=1}^{K} f_k(x_i), f_k \in \mathfrak{F} \quad (3)$$

Where $\boldsymbol{F}$ represents a possible decision tree space.

Initially, these data were run through a treatment and organisation stage that included: (i) developing categorical variables; (ii) checking for missing values and eliminating inconsistent records; (iii) changing date fields to the appropriate format; and (iv) addressing imbalances among classes. The Synthetic Minority Over-Sampling Technique (SMOTE) was used here, generating synthetic instances in minority neighbourhoods and lessening classifier bias with no mere duplication of observations (Chawla et al., 2002).

The dataset was divided into 70% for training and 30% for testing, using stratified sampling. The option for a single training-test division was intended to preserve the clarity of the model and allow direct comparisons with similar studies in the literature. However, it is acknowledged that this approach may lead to estimate variability, and the use of cross-validation is recommended in future studies, preferably with spatial or temporal blocks.

The performance assessment evaluated accuracy and the Area Under the Receiver Operating Characteristic Curve (AUC-ROC), ensuring an even balance between precision and sensitivity. To interpret the model and identify the most relevant factors, variable significance graphs were generated from gain values; Shapley Additive Explanations (SHAP) values were used to understand the marginal effects of each variable.

This approach helped estimate the probabilities of fatal accidents along different road segments. It also allowed identification of major fatality risk predictors, highlighting accident types, motorcycle and truck involvement, geographic location (LAT/LONG) and temporal factors, such as days of the week (particularly Saturday).

The main hyperparameters used in the model were: *eta* = 0.1; *max_depth* = 6; *nrounds* = 100; *subsample* = 0.8; *colsample_bytree* = 0.8; objective = *binary:logistic; eval_metric = auc.* The choice of these parameters was steered by empirical tests and recommendations drawn from the literature, seeking an even balance between predictive performance and overfitting control.

The interpretation stage used SHAP, breaking predictions down into additive contributions by variables (Shapley values), thus underpinning global importance and local effects analyses (Lundberg; Lee, 2017).

It should be noted that the inclusion of geographic coordinates (latitude and longitude) as explanatory variables may result in overlapping spatial information, as they may reflect spatial patterns already present in response variables. This study retains these variables, in order to capture spatial effects not directly observed, serving as proxies for road environment characteristics. However, the findings associated with these variables should be interpreted with caution, considered not as causal relationships, but rather as residual spatial dependence indicators.

4. FINDINGS

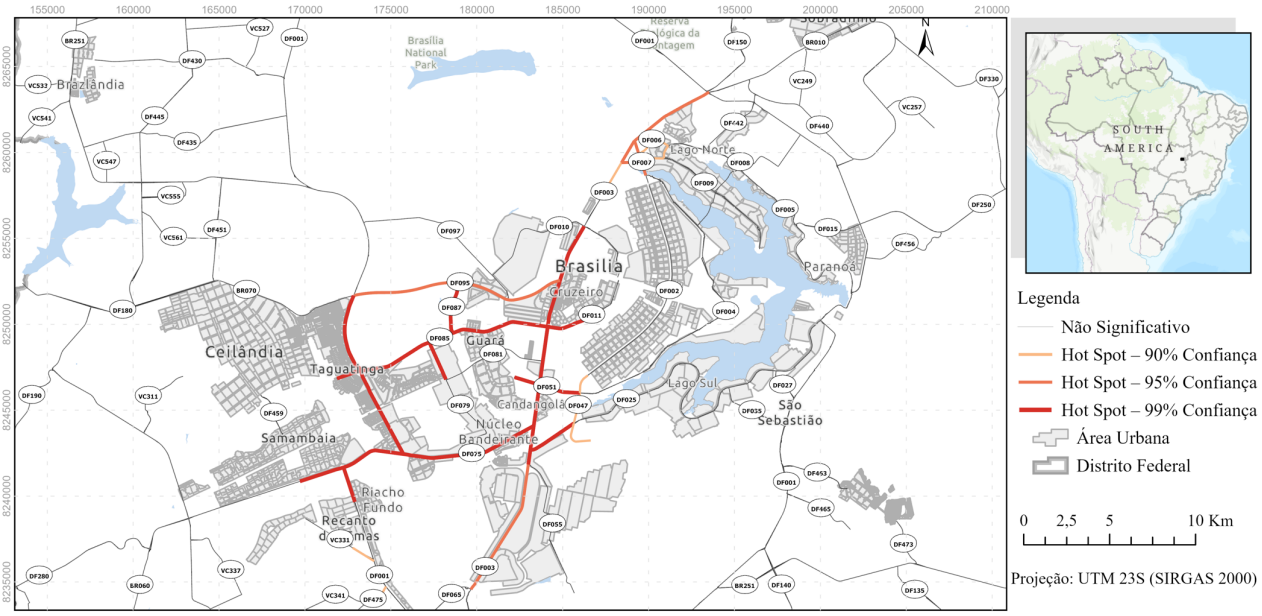
Between 2014 and 2023, 9,055 motorcycle accidents were recorded in the FDHS, of which 439 resulted in deaths and 8,616 had non-fatal victims. These totals refer to the geocoded and validated records used in subsequent analyses.

Application of the Hot Spot Analysis technique (Getis-Ord Gi*) identified statistically significant patterns for spatial accident clusters involving motorcyclists in the FDHS (Figure 2). This approach distinguishes segments with high accident rates (hot spots) from others with few accidents (cold spots), by examining their geographic contexts and the spatial distribution of these events. By including spatial autocorrelation, this method pinpoints areas where observed values are not distributed randomly, but are rather grouped consistently, reflecting the presence of local factors that increase or decrease accident risks.

This analysis highlighted hot spots with high statistical significance, distributed mainly along structural thoroughfares connecting downtown Brasília to outlying administrative regions and nearby towns. Highlighted segments include the DF-001, DF-003, DF-075, DF-085, and DF-095 highways, in numerical order. With continuous record clusters, these segments form critical corridors within this road network. Areas not highlighted on the map show stretches without statistical significance, while some outlying regions present low occurrence values, indicating cold spots. This spatial demarcation confirms that the heaviest clusters are grouped in the central-southeastern portion of the Federal District, along high connectivity routes with heavy daily traffic flows.

Presenting details of critical corridors identified in Figure 2, Table 1 lists road segments rated as hot spots, together with the highest observed significance levels, total length (km), and average accident rates per kilometre. This overview complements the map, for easier ranking of roads with heavier traffic and higher risks.

Figure 2 – Motorcycle accident hot spots (Gi*) in FDHS, 2014–2023.



Source: Authors.

Table 1 – Segments with significant motorcycle accident clusters (Getis-Ord Gi*) in the FDHS, 2014–2023.

Highway	Total length (km)	Average rate (accidents/km)	Higher significance level	Present levels
DF-001	16,05	68,68	99%	99%
DF-003	31,16	45,37	99%	99%, 95%, 90%
DF-005	0,79	15,18	90%	90%
DF-006	2,25	2,66	90%	90%
DF-007	2,12	23,62	95%	95%
DF-009	2,53	15,01	95%	95%, 90%
DF-011	2,24	50,96	99%	99%
DF-025	2,98	26,81	99%	99%
DF-047	5,1	17,25	90%	90%
DF-051	3,94	21,59	99%	99%
DF-075	8,02	85,71	99%	99%
DF-079	2,37	18,17	99%	99%
DF-085	13,01	53,49	99%	99%
DF-087	3,03	18,16	99%	99%
DF-095	12,54	35,97	95%	95%
DF-475	1,51	9,96	90%	90%

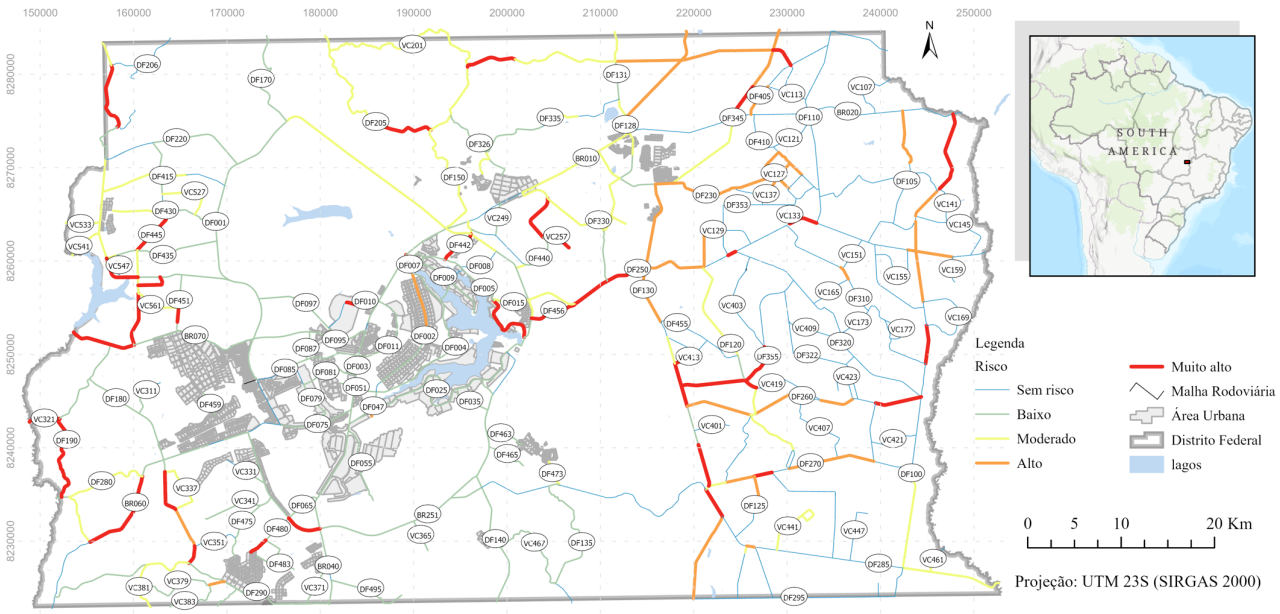
Source: Authors.

In the road network as a whole, 46 segments ranked as hot spots, with a total length of 113.78 km. Based on statistical significance, areas at 99% (68.69 km; 60.4% of the total) prevail, followed by 95% (30.69 km; 27.0%) and 90% (14.40 km; 12.7%). In terms of road coverage, Table 1 lists 18 highways with critical segments; along ten of them, the highest identified level was 99%; for three, the highest level was 95%; reaching 90% for the remaining five. These spatial patterns are presented in Figure 2, shown as continuous corridors with heavier traffic flows.

By highway, the longest hot spots are clustered in DF-003 (31.16 km; 27.4% of the total; 99% predominant, with levels of 99%, 95% and 90%), DF-001 (16.05 km; 14.1%; 99%), DF-085 (13.01 km; 11.4%; 99%), DF-095 (12.54 km; 11.0%; 95%) and DF-075 (8.02 km; 7.0%; 99%). Considering the average accident rate per km (weighted by length), DF-075 (85.71 accidents/km), DF-001 (68.68 accidents/km) and DF-085 (53.49 accidents/km) are notable, while DF-003 has 45.37 accidents/km. At the current intersection, DF-002 had no segments ranked as hot spots. These findings are convergent with Figure 2, showing the DF-001, DF-003, DF-075 and DF-085 highways as the main critical corridors by length and significance.

As a complement to the spatial diagnosis, Figure 3 presents the XGBoost Risk Map for motorcycle accidents in the FDHS, divided into five levels that range from Very Low to Very High. The classifier performance is summarised in Table 3 (confusion matrix) and Table 4 (global metrics; AUC-ROC = 0.8843), while the main predictors are listed by gain in Table 2, listing accident types, motorcycle ×truck interactions, locations, and days of the week.

Figure 3 – Fatal motorcycle accident risk map for the FDHS.



Source: Authors.

This Risk Map presents the likelihood of fatalities resulting from accidents, rather than event volumes. Consequently, rural areas and segments with lighter traffic flows may appear as high or very high risk, as speeding traffic, poor streetlighting, narrow shoulders, and longer service response times increase the chances of death should an event occur. In contrast, low to moderate risks predominate in the structuring corridors (DF-085/EPTG, DF-075/EPNB, DF-095/EPCL, DF-003/EPIA), peaking at junctions, roundabouts, and access roads leading to the DF-001 highway, as well as federal highways cutting through the Federal District. This patchy pattern is location-specific, clustered where traffic operations are most complex. It is consistent with the most influential predictors (Table 2), notably accident types, motorcycle x truck interactions, geographic coordinates (LAT/LONG), and days of the week component (Saturday).

Table 2 - Variables Ranking

Rank	Variable	Gain
1	Registration Year	0.309
2	Type – Head-on collision	0.093
3	Type – Collision with fixed object	0.083
4	Location – Coordinates (LAT/LONG)	0.076
5	Motorcycle × truck involvement	0.040
6	Type – Rear-end collision	0.036
7	Type – Side collision	0.032
8	Day of the week – Saturday	0.031
9	Type – Vehicle fall	0.028

Source: Authors.

These figures were estimated by XGBoost gains (mean reduction in the objective function of the nodes, where each variable participates, accumulated along the trees). These nine predictors cluster 72.8% of total gains. The highest contribution was from registration year (gain = 0.309; ≈ 42%), followed by accident type – head-on collision (0.093), collision with a fixed object (0.083), rear-end collision (0.036), side collision (0.032) and vehicle fall (0.028); motorcycle × truck involvement (0.040); location (LAT/LONG) coordinates (aggregate = 0.076; ≈ 10%); and by day of the week – Saturday (0.031). The prominence of the registration year is compatible with the series time trend; coordinates capture remaining spatial autocorrelations, while the type group indicates more severe harmful mechanisms. It should be noted that "gain" is a specific metric of the algorithm and does not imply causality; moreover, temporal/spatial predictors can introduce temporal/spatial leakage and inflate discrimination under random partitions.

From the classificatory standpoint, the model achieved good discriminant power, with the Area Under the Receiver Operating Characteristic Curve (AUC-ROC) = 0.8843. In the test sample, the confusion matrix (Table 3) showed True Negatives (TN) = 1,724; False Positives

(FP) = 9; False Negatives (FN) = 43; and True Positives (TP) = 35; with accuracy = 0.9713 (95%CI: 0.9625–0.9785); Kappa Coefficient (κ) = 0.560; and Balanced Accuracy = 0.722. High specificity was noted for the Non-Fatal class (0.995), with moderate sensitivity for the Fatal class (0.449).

The global metrics presented in Table 4 consolidate Performance as the Area Under the Curve (AUC), Accuracy, Kappa Coefficient (κ), Sensitivity, Specificity, Positive Predictive Value (PPV), Negative Predictive Value (NPV), and Balanced Accuracy, providing an overview for comparison with future threshold and balancing adjustments.

Table 3 - Confusion Matrix

	Referência: Não Fatal	Referência: Fatal
Predicted: Non-Fatal	TN = 1.724	FN = 43
Predicted: Fatal	FP = 9	TP = 35

Source: Authors.

Table 4 - Test suite performance metrics.

Métrica	Valor
AUC-ROC	0.8843
Accuracy	0.9713
95%CI (Accuracy)	0.9625 – 0.9785
Kappa	0.560
Sensitivity (Fatal)	0.449
Specificity (Non-Fatal)	0.995
PPV (Fatal)	0.795
NPV (Non-Fatal)	0.976
Balanced Accuracy	0.722
Total (N)	1.811

Source: Authors.

These metrics assess performances from different angles: AUC-ROC measures overall model discriminant power other (probability of scoring a "fatal" case above a "non-fatal" one, regardless of the threshold); Accuracy is the total proportion of correct answers; Sensitivity indicates the fraction of correctly identified fatal cases; Specificity is the fraction of non-fatal cases correctly discarded; PPV is the probability of a predicted "fatal" being an actual death; NPV is the probability of a predicted "non-fatal" event being actually non-fatal; the Kappa coefficient expresses over-the-odds agreement (useful for unbalanced bases); and balanced accuracy corresponds to the mean between sensitivity and specificity,

mitigating class imbalance effects. As this assessment used a single training-test partition, these estimates are subject to greater variability; it is recommended that cross-validation and/or early stopping should be used in future studies to ensure the robustness of the findings.

5. DISCUSSION

The spatial analysis using the Getis-Ord Gi* method confirmed the formation of critical corridors for motorcycle accidents in the Federal District Highway System, particularly along structural thoroughfares such as the DF-001, DF-003, DF-075, DF-085 and DF-095 highways. This pattern confirms that the event distribution is not random, but is instead aligned with high connectivity highways carrying heavy daily traffic, and with intensive interactions between urban and peri-urban flows. In applied terms, this indicates that the accident frequency is closely associated with the functional structure of the road network, especially along high-demand corridors with very complex operations.

These findings converge with studies demonstrating the usefulness of spatial analysis techniques for identifying critical areas, with support for territorially oriented interventions. Studies such as those by Tippayanate et al. (2024), Haque et al. (2010) and Mohammed et al. (2023) show that accident distribution tends to reflect location-specific characteristics, connectivity patterns, and road system operating conditions. In Brazil's Federal District, hot spots clustered along structural thoroughfares suggest that the combination of heavy traffic flows and driver x rider conflicts along metropolitan road networks is a core element for understanding event clusters involving motorcyclists.

Taken together, the findings do not indicate a broad overlap between "where accidents occur most" and "where the odds of death are higher if an event occurs". This Hot Spot analysis pinpoints high-frequency urban corridors, while the XGBoost predictive map indicates mainly peri-urban and rural segments, where conditional probabilities of fatalities tend to be higher. This contrast is significant, as it underscores two distinct road risk aspects: event frequency and expected severity. Consequently, areas with large numbers of occurrences do not necessarily coincide with locations where fatal outcomes are more likely.

This distinction is consistent with recent literature on risk-steered road safety. Studies aligned with the Safe System paradigm indicate that areas with higher driving speeds, poorer streetlighting, narrower protective shoulders, and longer response times tend to ramp up accident severity, even when event volumes are relatively smaller. Along these lines, the findings of this study suggest that urban corridors in the FDHS require actions designed to reduce accident frequency, while peri-urban and rural segments need interventions focused primarily on mitigating their severity.

For predictive modelling, the XGBoost findings indicated that head-on collisions, collisions with fixed objects, side and rear collisions, and motorcycle x truck interactions are among the main factors associated with higher fatality probabilities. These findings are compatible with international evidence pointing to greater severity in events with higher energy transfers, more body exposure for motorcyclists, and interactions with larger vehicles. Studies such as those by Agyemang, Adanu and Jones (2021), Wisutwattanasak et al. (2024) and Yang et al. (2022) stress that motorcycle accident severity depends not only on the actual occurrences, but also on operating contexts, conflict type, and surrounding road conditions.

The relevance of temporal and operational variables, such as Saturdays and accident types, also suggests that risks are not merely spatial. They also result from combinations of location, traffic dynamics, and road use contexts. This point is important because it underlines the need for intersectoral policies that blend engineering, oversight, and speed management with specific territorial and temporal approaches. In other words, the model's usefulness lies not only in predicting severe events; it is also a source of evidence for more selective and territorially calibrated interventions.

From the predictive performance standpoint, the model presented a highly accurate AUC-ROC of 0.8843, indicating good discriminatory ability. Nevertheless, its moderate sensitivity shows that some of the deaths were not captured by the classifier, with caution recommended for operational interpretations of this model. In road safety contexts, this constraint is particularly important, as the practical usefulness of a model depends not only on good overall performance, but also on its ability to identify rare and more serious events.

Some other limitations should also be mentioned. First, the use of a single training-test partition may increase estimate variability, so future applications could benefit from cross-validation and, ideally, from strategies with spatial or temporal lockouts. Next, although the inclusion of latitude and longitude as explanatory variables is useful for capturing residual spatial dependence, this may lead to overlapping spatial information, with its effects being interpreted as locational proxies, rather than causal relationships. Finally, the absence of variables related directly to road geometry, speed limits, and traffic volumes limits the explanatory capacity of the model, although some of these effects may have been partially captured by locational and operational variables.

Despite these constraints, the findings demonstrate that a combination of spatial analysis and predictive modelling offers important analytical benefits. While Getis-Ord Gi* helps pinpoint corridors with more accident clusters, XGBoost adds expected event severity data. This integrated approach contributes to a more consistent interpretation of road risks, extending the potential for using these findings for road safety planning in Brazil’s Federal District.

6. CONCLUSION

This study showed that a combination of spatial analysis (Getis-Ord Gi*) and predictive modelling (XGBoost) is a useful analytical strategy for understanding motorcycle accidents in the Federal District Highway System. The findings confirmed the existence of corridors with more accident clusters, especially along structural thoroughfares with high connectivity, while disclosing that the highest conditional fatality probability distribution tends to be different, especially along peri-urban and rural segments.

The main findings of this study thus show that accident frequency and fatality risks do not slot into the same analytical dimension. While spatial analysis helps pinpoint areas with higher event volumes, the predictive model identifies segments with higher expected severity, despite fewer events. This distinction underscores the need for specific intervention strategies in Brazil's Federal District.

From an applied standpoint, the findings suggest that busier urban corridors with more accident clusters require steps designed to reduce event frequency, such as restructuring traffic flows, oversight activities, and operating upgrades. On the other hand, segments with higher probabilities of fatal outcomes require actions designed to mitigate event severity, especially through speed management, wider shoulders, better visibility, and more attention to conflicts involving large vehicles.

In methodological terms, the study contributes by integrating two approaches that are often addressed individually in the literature: identifying spatial clusters and predicting accident severity. Although these techniques are already known, their combined deployment, with emphasis on the distinction between event clusters and conditional fatality risks, extends the analytical potential for road safety planning.

Finally, it is recommended that future studies include variables related more directly to characteristics such as road infrastructure, speed limits, traffic volumes, and complementary oversight and service data. The use of cross-validation strategies is also recommended, with spatial or temporal blocks, thus underscoring model robustness, while lessening the possible effects of residual spatial dependence.

BIBLIOGRAPHY

AGYEMANG, W.; ADANU, E. K.; JONES, S. (2021). Understanding the factors that are associated with motorcycle crash severity in rural and urban areas of Ghana. Journal of Advanced Transportation, 2021, e6336517. DOI: https://doi.org/10.1155/2021/6336517.

BRASIL. Secretaria Nacional de Trânsito (SENATRAN). (2024). Frota de Veículos – 2024 (Registro Nacional de Veículos Automotores – RENAVAM). Ministério dos Transportes, Brasília, DF.

BRENAC, T.; CLABAUX, N.; PERRIN, C.; VAN ELSLANDE, P. (2006). Motorcyclist conspicuity-related accidents in urban areas: a speed problem? Advances in Transportation Studies – Section A, n. 8, p. 23–29.

CHAWLA, N. V.; BOWYER, K. W.; HALL, L. O.; KEGELMEYER, W. P. (2002). SMOTE: synthetic minority over-sampling technique. Journal of Artificial Intelligence Research, v. 16, p. 321–357. DOI: https://doi.org/10.1613/jair.953.

CHEN, F.; ZHANG, Q.; WANG, Z.; et al. (2025). Traffic accident severity prediction based on an enhanced MSCPO-XGBoost hybrid model. Scientific Reports, v. 15, art. 25729. DOI: https://doi.org/10.1038/s41598-025-00797-7.

DISTRITO FEDERAL. Departamento de Trânsito do Distrito Federal (DETRAN-DF). (2024). Frota de veículos registrados no DF em circulação — 2º trimestre de 2024. Detran-DF, Brasília, DF.

EUROPEAN COMMISSION. (2023). Road Safety Thematic Report: Safe System Approach. European Commission, Brussels.

GETIS, A.; ORD, J. K. (1992). The analysis of spatial association by use of distance statistics. Geographical Analysis, v. 24, n. 3, p. 189–206. DOI: https://doi.org/10.1111/j.1538-4632.1992.tb00261.x.

HAQUE, M. M.; CHIN, H. C.; HUANG, H. (2010). Applying Bayesian hierarchical models to examine motorcycle crashes at signalized intersections. Accident Analysis & Prevention, v. 42, n. 1, p. 203–212. DOI: https://doi.org/10.1016/j.aap.2009.07.022.

JIANG, F.; YUEN, K. K. R.; LEE, E. W. M. (2020). Analysis of motorcycle accidents using association rule mining-based framework with parameter optimization and GIS technology. Journal of Safety Research, v. 75, p. 292–309. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jsr.2020.09.004.

LUNDBERG, S. M.; LEE, S.-I. (2017). A unified approach to interpreting model predictions. In: Advances in Neural Information Processing Systems (NeurIPS 2017). DOI: https://doi.org/10.48550/arxiv.1705.07874.

MIAO, J.; PAN, Y.; ZHAO, K. (2025). Analysis of the spatiotemporal effects on the severity of motorcycle accidents without helmets and strategies for building sustainable traffic safety. Sustainability, v. 17, n. 8, art. 3280. DOI: https://doi.org/10.3390/su17083280.

MOHAMMED, S.; ALKHEREIBI, A. H.; ABULIBDEH, A.; JAWARNEH, R. N.; BALAKRISHNAN, P. (2023). GIS-based spatiotemporal analysis for road traffic crashes: in support of sustainable transportation planning. Transportation Research Interdisciplinary Perspectives, v. 20, 100836. DOI: https://doi.org/10.1016/j.trip.2023.100836.

OECD/ITF. (2008). Towards Zero: Ambitious Road Safety Targets and the Safe System Approach. OECD/ITF, Paris.

PANUMASVIVAT, J.; et al. (2024). Unveiling the road to safety: understanding the factors influencing motorcycle accidents among riders in rural Chiang Mai, Thailand. Heliyon, v. 10, n. 3, e25698. DOI: https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e25698.

QIAN, R. Y.; WANG, X. (2023). Prediction of road traffic accident severity based on XGBoost-BP neural network. Advances in Transportation Studies, v. 61, p. 19–36. DOI: https://doi.org/10.53136/97912218091902.

SANTOS JÚNIOR, C. J.; SILVA, J. P.; ROCHA, T. J. M. (2022). Análise da ocorrência de acidentes de trânsito fatais nas capitais do Nordeste do Brasil. Hygeia – Revista Brasileira de Geografia Médica e da Saúde, v. 18, p. 44–53. DOI: https://doi.org/10.14393/hygeia1858395.

SANTOS, J. P.; GUIMARÃES, P. H.; SILVA, B. A. L.; CAMPANI, A. R.; OLIVEIRA, J. M. V. (2023). DERGeo: geovisualizador de informações geográficas para gestão do Sistema Rodoviário do Distrito Federal. Revista Brasileira de Transportes, v. 3, n. 1, p. 62–85. DOI: https://doi.org/10.12660/rbt.v3n1.2023.89030.

SIQUEIRA, J. S.; WERNECK, G. L.; PENA, P. G. L.; FERNANDES, R. C. P. (2025). Trabalho subordinado de entregadores em empresas-plataforma de entrega e acidentes nas ruas: magnitude e fatores associados. Cadernos de Saúde Pública, v. 41, n. 3, e00204723. DOI: https://doi.org/10.1590/0102-311xpt204723.

TIPPAYANATE, N.; IMPOOL, T.; SUJAYANONT, P.; MUTTITANON, W.; CHEMIN, Y.; SOM-ARD, J. (2024). A geospatial analysis of motorcycle accident risk factors in Khon Kaen Municipality, Thailand: examining the chain of survival and potential strategies. International Journal of Geoinformatics, v. 20, n. 9, p. 71–82. DOI: https://doi.org/10.52939/ijg.v20i9.3547.

WORLD HEALTH ORGANIZATION (WHO). (2023). Global status report on road safety 2023. WHO, Geneva.

WISUTWATTANASAK, P.; SE, C.; CHAMPAHOM, T.; et al. (2024). Factors affecting single and multivehicle motorcycle crashes: insights from day and night analysis using XGBoost-SHAP algorithm. Big Data and Cognitive Computing, v. 8, n. 10, 128. DOI: https://doi.org/10.3390/bdcc8100128.

YANG, Y.; LI, Y.; WANG, J.; et al. (2022). Predicting freeway traffic crash severity using XGBoost-Bayesian network model with consideration of features interaction. Journal of Advanced Transportation, v. 2022, 4257865. DOI: https://doi.org/10.1155/2022/4257865.

ARTIGO 7

SEGURANÇA VIÁRIA DE MOTOCICLISTAS EM MUNICÍPIOS TURÍSTICOS: PROPOSTA EDUCATIVA DE CURTO PRAZO BASEADA NA MATRIZ DE HADDON

Deivid Ristow da Costa (Policia Militar)

RESUMO

Este artigo discute a educação para o trânsito como estratégia de curto prazo para a promoção da segurança viária de motociclistas em municípios turísticos de pequeno porte, marcados por crescimento urbano acelerado, sazonalidade populacional e pressão sobre a mobilidade urbana. Trata-se de estudo de abordagem qualitativa, de natureza analítico-reflexiva, fundamentado em revisão narrativa da literatura e em análise contextual de cenário urbano turístico. A discussão articula os referenciais do Sistema Seguro e da Matriz de Haddon com documentos normativos e institucionais relacionados à segurança viária, à mobilidade urbana e à educação para o trânsito. A análise evidencia que a vulnerabilidade dos motociclistas resulta da interação entre fatores humanos, veiculares e ambientais, sendo agravada por congestionamentos, disputas pelo espaço viário, circulação de veículos elétricos leves, ciclomotores e equipamentos de mobilidade individual autopropelidos, além de condutas de risco. Em contextos com essas características, intervenções estruturais tendem a demandar tempo, recursos e coordenação intersetorial, o que reforça a relevância de medidas educativas de rápida implementação. Propõe-se uma intervenção organizada segundo as fases do evento traumático, com ações em escolas, empresas, redes sociais, abordagens educativas e painéis de mensagem variável. Conclui-se que estratégias educativas contínuas, territorializadas e articuladas com a fiscalização e a engenharia de tráfego podem subsidiar ações intersetoriais de prevenção, contribuindo para a redução de agravos relacionados ao trânsito e para o fortalecimento de políticas públicas de saúde, mobilidade e segurança viária.

Palavras-chave: segurança viária; motociclistas; educação para o trânsito; matriz de Haddon; municípios turísticos; mobilidade urbana.

ABSTRACT

This article discusses traffic education as a short-term strategy for promoting motorcycle rider road safety in small tourist municipalities marked by rapid urban growth, population seasonality, and increasing pressure on urban mobility. This is a qualitative, analytical-reflective study based on a narrative literature review and contextual analysis of a tourist urban setting. The discussion articulates the Safe System approach and the Haddon Matrix with normative and institutional documents related to road safety, urban mobility, and traffic education. The analysis shows that motorcycle riders' vulnerability results from the interaction between human, vehicle-related, and environmental factors, aggravated by traffic congestion, disputes over road space, the circulation of light electric vehicles, mopeds, self-propelled mobility devices, and risk behaviors. In contexts with these characteristics, structural interventions tend to require time, resources, and intersectoral coordination, which reinforces the relevance of educational measures that can be rapidly implemented. The article proposes an intervention organized according to the phases of the traumatic event, including actions in schools, workplaces, social media, educational campaigns, and variable message signs. It concludes that continuous, territorialized educational strategies, when articulated with enforcement and traffic engineering, can support intersectoral prevention actions, contributing to the reduction of traffic-related injuries and to the strengthening of public policies on health, mobility, and road safety.

Keywords: road safety; motorcycle riders; traffic education; Haddon Matrix; tourist municipalities; urban mobility.

1. Introdução

Os sinistros de trânsito permanecem entre os principais problemas contemporâneos de saúde pública e de gestão da mobilidade urbana, configurando causa relevante de mortalidade, incapacidade e agravos evitáveis. Em escala global, mais da metade das mortes no trânsito ocorre entre usuários vulneráveis, como pedestres, ciclistas e motociclistas, o que evidencia a necessidade de políticas públicas sensíveis às assimetrias de proteção física existentes no espaço viário (World Health Organization, 2023a, 2023b). No Brasil, as lesões envolvendo motociclistas representam um componente expressivo da morbimortalidade no trânsito, com repercussões diretas sobre os serviços de urgência, reabilitação e vigilância em saúde (Brasil, Ministério da Saúde, 2023). Além disso, estudos nacionais indicam tendência relevante de mortalidade e vulnerabilidade associada ao uso de motocicletas, reforçando a centralidade desse grupo nas agendas de prevenção de lesões no trânsito (Corgozinho, Montagner, & Rodrigues, 2018; Souza et al., 2020). O Código de Trânsito Brasileiro estabelece que a segurança viária e a educação para o trânsito constituem deveres do poder público e da coletividade, devendo orientar a organização do sistema de circulação e a formação dos usuários da via (Brasil, 1997), em articulação com políticas de saúde, prevenção de agravos e promoção da vida no âmbito do Sistema Único de Saúde.

Em municípios de pequeno porte com vocação turística, a segurança viária assume contornos específicos. O crescimento urbano acelerado, a ampliação da frota, a intensificação de atividades econômicas sazonais e a entrada periódica de visitantes aumentam a pressão sobre infraestruturas viárias frequentemente limitadas. Esse cenário tende a intensificar conflitos entre diferentes modos de deslocamento, especialmente em áreas centrais, vias de acesso, corredores comerciais e regiões com maior concentração de serviços. Tais características são observadas em diversos contextos urbanos brasileiros com perfil semelhante, nos quais a gestão da mobilidade enfrenta desafios relacionados à sazonalidade, à limitação da malha viária e à necessidade de compatibilizar a circulação local, o turismo e a segurança dos usuários.

Nesse contexto, os motociclistas ocupam posição central. A motocicleta combina agilidade, baixo custo relativo e ampla utilização em deslocamentos cotidianos e atividades laborais, mas apresenta elevada vulnerabilidade em razão da reduzida proteção estrutural de seus usuários, o que amplia a probabilidade de lesões graves em sinistros de trânsito. Além disso, fatores como circulação entre veículos, pressão por rapidez, baixa percepção de risco, condutas imprudentes e compartilhamento de vias saturadas agravam a exposição desse grupo. Mais recentemente, a incorporação de veículos elétricos leves, ciclomotores e equipamentos de mobilidade individual autopropelidos ao ambiente urbano adicionou novas camadas de complexidade à regulação, à fiscalização e à convivência segura no espaço viário, especialmente diante da necessidade de adequação às normas nacionais que disciplinam sua circulação em vias públicas (Brasil, Conselho Nacional de Trânsito, 2023).

Embora intervenções estruturais, como a requalificação viária, a reorganização de fluxos, a implantação de dispositivos de moderação de tráfego e a adequação da infraestrutura urbana, sejam fundamentais para a redução sustentada dos riscos, tais medidas demandam planejamento técnico, recursos financeiros, coordenação intersetorial e prazos mais prolongados de execução. Nesse intervalo, estratégias educativas podem assumir papel

relevante como medidas de curto prazo, especialmente quando orientadas por diagnóstico contextual e articuladas a ações de fiscalização e engenharia de tráfego. A educação para o trânsito, nesse sentido, não se limita à transmissão de informações, mas pode atuar sobre percepções de risco, atitudes, práticas cotidianas e corresponsabilização dos diferentes usuários da via.

Diante desse cenário, o presente artigo tem como objetivo discutir a educação para o trânsito como estratégia de curto prazo para a promoção da segurança viária de motociclistas em municípios turísticos de pequeno porte. Para tanto, toma-se Porto Belo (SC) como contexto de referência, considerando suas características de município turístico, a pressão sazonal sobre a mobilidade urbana e os desafios associados à proteção de usuários vulneráveis. A partir dessa análise, propõe-se um conjunto de ações educativas territorializadas, fundamentadas nos referenciais do Sistema Seguro e da Matriz de Haddon, com potencial de adaptação a contextos municipais semelhantes.

Ao deslocar a análise para o campo da gestão do trânsito, o artigo busca contribuir para o debate sobre estratégias educativas de segurança viária aplicáveis a municípios turísticos de pequeno porte, especialmente em contextos de circulação intensa de motocicletas, sazonalidade populacional e convivência entre diferentes modos de deslocamento.

2. Metodologia

Este estudo caracteriza-se como uma revisão narrativa de abordagem qualitativa, de natureza analítico-reflexiva, complementada por análise contextual de um cenário urbano turístico de pequeno porte, tomando o município de Porto Belo (SC) como contexto empírico de referência. O delineamento foi adotado com o objetivo de articular referenciais teóricos, documentos normativos e elementos da realidade local relacionados à segurança viária, à vulnerabilidade de motociclistas e à educação para o trânsito, sem a pretensão de produzir inferências causais, estimativas epidemiológicas primárias ou avaliação de impacto de intervenção previamente implementada.

A busca de informações foi realizada em bases de dados científicas e mecanismos de busca acadêmica, incluindo SciELO, PubMed e Google Scholar, além de documentos institucionais e normativos de órgãos públicos relacionados à segurança viária, à saúde, à mobilidade urbana e à educação para o trânsito. Foram utilizados, isoladamente e em combinação, os seguintes descritores: “segurança viária”, “motociclistas”, “educação para o trânsito”, “Sistema Seguro”, “matriz de Haddon” e “mobilidade urbana”, bem como seus correspondentes em inglês e espanhol, quando pertinente.

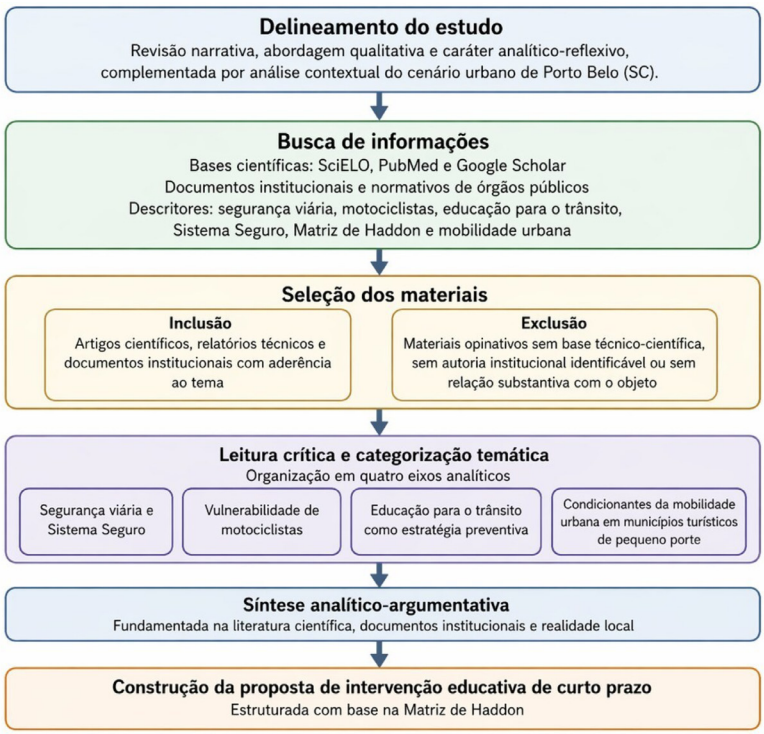
Também foram analisados documentos oficiais e institucionais, incluindo o Código de Trânsito Brasileiro, o Plano Nacional de Redução de Mortes e Lesões no Trânsito, materiais técnicos da Polícia Rodoviária Federal, documentos normativos do Conselho Nacional de Trânsito e documentos municipais relacionados ao planejamento urbano, à circulação viária e à mobilidade em Porto Belo. A inclusão desses documentos teve como finalidade relacionar os referenciais gerais de segurança viária com condicionantes concretos observados em municípios turísticos de pequeno porte, marcados por sazonalidade populacional, intensificação dos fluxos de circulação e pressão sobre a infraestrutura urbana.

Foram incluídos artigos científicos, relatórios técnicos, documentos normativos e materiais institucionais com aderência direta aos temas da segurança viária, da vulnerabilidade de motociclistas, da prevenção de lesões no trânsito, da educação para o trânsito e da mobilidade urbana em contextos municipais. Foram considerados materiais publicados em português, inglês ou espanhol. Foram excluídos textos opinativos sem fundamentação técnico-científica, documentos sem autoria institucional identificável, publicações sem relação substantiva com o objeto de análise e materiais que não contribuíssem para a construção do referencial analítico ou da proposta educativa.

A análise dos materiais foi realizada por meio de leitura crítica e categorização temática, organizada em quatro eixos analíticos: segurança viária e modelo do Sistema Seguro; vulnerabilidade de motociclistas; educação para o trânsito como estratégia preventiva; e condicionantes da mobilidade urbana em municípios turísticos de pequeno porte. A partir dessa síntese, foi elaborada uma proposta de intervenção educativa de curto prazo, estruturada com base na matriz de Haddon, contemplando ações voltadas aos momentos anterior, concomitante e posterior ao evento traumático.

Os resultados devem ser interpretados como uma síntese analítico-argumentativa fundamentada na literatura científica, em documentos institucionais e na análise contextual do cenário estudado. Assim, o estudo não constitui levantamento estatístico primário de sinistros de trânsito no município, tampouco avaliação de efetividade de uma política pública já implementada. A Figura 1 apresenta a síntese do encadeamento analítico adotado no estudo, desde a definição do delineamento metodológico até a construção da proposta de intervenção educativa.

Figura 1 — Encadeamento analítico de estudo e construção da proposta de intervenção educativa



Fonte: Elaborado pelo autor com base no percurso metodológico

3. CONDICIONANTES LOCAIS DA SEGURANÇA VIÁRIA EM MUNICÍPIO TURÍSTICO DE PEQUENO PORTE: O CASO DE PORTO BELO (SC)

Porto Belo (SC) constitui um contexto relevante para a análise da segurança viária em municípios turísticos de pequeno porte, em razão da combinação entre expansão urbana, crescimento populacional, valorização imobiliária e intensa atratividade sazonal. Nessa configuração, a mobilidade urbana deixa de representar apenas uma dimensão operacional da circulação e passa a integrar, de forma mais ampla, a agenda de planejamento e gestão urbana. O Plano de Circulação Viária de Porto Belo reconhece esse cenário ao identificar gargalos estruturais, propor reorganizações de fluxos e apontar a necessidade de medidas voltadas à melhoria da fluidez e da segurança viária, sobretudo em corredores de maior centralidade e circulação (Porto Belo, 2025).

Entre esses corredores, destaca-se a Avenida Governador Celso Ramos, eixo estruturante que articula áreas centrais, acessos locais e o deslocamento em direção ao município de Bombinhas. Em trechos mais adensados e estreitos, a associação entre elevado volume de veículos, conversões frequentes, presença de frentes comerciais, travessias de pedestres e incremento sazonal da circulação cria um ambiente propício à intensificação de conflitos viários. Nesses contextos, a motocicleta tende a ser utilizada como alternativa funcional para enfrentar congestionamentos e reduzir tempos de deslocamento, o que, por outro lado, amplia a exposição a manobras arriscadas, circulação lateral entre filas de veículos e situações de maior instabilidade operacional no tráfego.

A Figura 2 apresenta uma representação cartográfica esquemática do corredor da Avenida Governador Celso Ramos, entre o acesso principal pela BR-101 e a entrada de Bombinhas, com indicação dos trechos de maior criticidade relacionados ao adensamento do trânsito e ao estreitamento da pista.

Figura 2 — Representação cartográfica esquemática do corredor da Avenida Governador Celso Ramos



Fonte: Elaboração própria com base em referências cartográfica de apoio

Além dos condicionantes estruturais, o cotidiano da circulação urbana também sugere a presença de comportamentos potencialmente associados ao aumento do risco viário, como manobras inseguras com motocicletas, circulação incompatível com a ambiência urbana e práticas orientadas por baixa percepção de risco. Embora este estudo não apresente base empírica própria para mensurar a frequência ou a distribuição dessas condutas, sua recorrência no debate público e institucional reforça a pertinência de intervenções preventivas voltadas à dimensão comportamental da segurança viária.

Outro elemento recente diz respeito à ampliação da circulação de veículos elétricos leves, ciclomotores e equipamentos de mobilidade individual autopropelidos, cuja presença em vias públicas passou a demandar maior atenção regulatória, educativa e fiscalizatória por parte dos municípios, em conformidade com as diretrizes estabelecidas pelo Conselho Nacional de Trânsito (Brasil, Conselho Nacional de Trânsito, 2023). A inserção desses modais em espaços viários já tensionados, muitas vezes sem definição clara de áreas de circulação, sem orientação adequada aos usuários e antes da adaptação plena da infraestrutura urbana, introduz novos fatores de conflito entre diferentes modos de deslocamento. Em municípios turísticos de pequeno porte, esse fenômeno tende a ser particularmente relevante, pois se soma à sazonalidade dos fluxos, à heterogeneidade dos perfis de usuários e às limitações da infraestrutura existente.

Sob essa perspectiva, a segurança viária em Porto Belo não depende exclusivamente da ampliação física da capacidade viária ou da realização de intervenções estruturais. Trata-se de um campo que envolve, igualmente, capacidades de governança, coordenação intersetorial, regulação, comunicação pública e educação para o trânsito. A partir dessa compreensão, a Figura 3 sintetiza os principais condicionantes locais que contribuem para a vulnerabilidade dos motociclistas, organizados segundo a lógica analítica da matriz de Haddon.

Figura 3 — Condicionamento locais da vulnerabilidade dos motociclistas em Porto Belo (SC), segundo a lógica da Matriz de Haddon



Fonte: Elaboração própria.

4. SEGURANÇA VIÁRIA, SISTEMA SEGURO E VULNERABILIDADE DE MOTOCICLISTAS

A segurança viária pode ser compreendida como o conjunto de políticas, dispositivos, práticas e arranjos institucionais voltados à prevenção de mortes e lesões graves no trânsito. Nas abordagens contemporâneas, observa-se o deslocamento de uma visão centrada exclusivamente na culpa individual para uma compreensão sistêmica do risco, na qual o desenho das vias, a velocidade, os veículos, o comportamento dos usuários, a regulação e a resposta pós-sinistro interagem na produção dos desfechos. O Plano Nacional de Redução de Mortes e Lesões no Trânsito e a literatura internacional convergem ao reconhecer que o erro humano é previsível e que o sistema de circulação deve ser concebido para absorver falhas sem convertê-las, necessariamente, em mortes ou lesões graves, em consonância com o Plano Global para a Década de Ação pela Segurança no Trânsito 2021-2030 e com o paradigma do Sistema Seguro (Brasil, 2018; World Health Organization, 2021, 2023a).

Nesse quadro, o paradigma do Sistema Seguro apresenta especial relevância. Seus pressupostos articulam vias mais seguras, velocidades compatíveis, veículos seguros, usuários protegidos e resposta pós-sinistro eficiente. A velocidade ocupa papel estruturante, pois condiciona tanto a probabilidade de ocorrência do sinistro quanto a gravidade das lesões dele decorrentes. Em áreas urbanas com circulação mista e presença de usuários vulneráveis, a gestão de velocidades compatíveis com o entorno é reconhecida como elemento central para salvar vidas, reduzir a severidade dos sinistros e melhorar a habitabilidade urbana (Sharpin et al., 2021; World Bank, 2024). Para motociclistas, essa relação é ainda mais crítica, considerando a menor estabilidade do veículo, a ausência de carroceria protetiva e a exposição direta do corpo ao impacto.

A matriz de Haddon, por sua vez, oferece um instrumento analítico útil para decompor os fatores associados aos sinistros de trânsito. Ao organizar os elementos de risco em dimensões humanas, veiculares e ambientais, distribuídas entre as fases pré-evento, evento e pós-evento, o modelo permite compreender o sinistro como processo, e não apenas como resultado isolado. Essa abordagem favorece a formulação de políticas preventivas e integradas, especialmente em contextos urbanos complexos, nos quais comportamento, desenho viário, regulação, fiscalização e atendimento emergencial se influenciam mutuamente (Haddon, 1980).

No caso dos motociclistas, a vulnerabilidade decorre precisamente dessa interação entre fatores. Na dimensão humana, incluem-se comportamentos como o excesso de velocidade, a desatenção, o consumo de álcool, a baixa percepção de risco, o uso inadequado de equipamentos de proteção e a busca por deslocamentos mais rápidos em cenários congestionados. Na dimensão veicular, destacam-se aspectos como a manutenção deficiente, pneus ou freios em más condições, iluminação precária e uso inadequado do capacete. Na dimensão ambiental, observam-se irregularidades no pavimento, sinalização insuficiente, geometrias inseguras, presença de areia ou resíduos na pista, conflitos com pedestres e coexistência desordenada entre diferentes modais.

Em municípios turísticos de pequeno porte, tais fatores tendem a ser intensificados pela sazonalidade e pela heterogeneidade dos usuários da via. Moradores, trabalhadores, entregadores, visitantes e condutores pouco familiarizados com a malha urbana compartilham corredores críticos em períodos de maior fluxo. Paralelamente, a ampliação da circulação de veículos elétricos leves, ciclomotores e equipamentos de mobilidade individual autopropelidos, muitas vezes antes da plena adaptação regulatória, institucional e infraestrutural, acrescenta novos desafios à convivência segura no espaço viário

(Brasil, Conselho Nacional de Trânsito, 2023). Esse cenário reforça a importância de estratégias educativas, regulatórias e operacionais voltadas à redução da exposição ao risco e à proteção dos usuários vulneráveis.

5. EDUCAÇÃO PARA O TRÂNSITO COMO ESTRATÉGIA DE CURTO PRAZO

No ordenamento brasileiro, a educação para o trânsito ocupa posição normativa expressa. O Código de Trânsito Brasileiro estabelece que ela deve ser promovida em todos os níveis de ensino e por meio de ações comunitárias, enquanto documentos institucionais de segurança viária a reconhecem como instrumento preventivo orientado à mudança comportamental, à humanização do trânsito e à corresponsabilização dos usuários da via (Brasil, 1997; Brasil, Polícia Rodoviária Federal, 2021).

Em termos de gestão pública, a educação para o trânsito apresenta potencial estratégico por combinar capilaridade social, custo relativamente reduzido e maior rapidez de implementação, quando comparada a intervenções estruturais de grande porte. Isso não significa substituir medidas de engenharia, fiscalização ou requalificação urbana, mas atuar de forma complementar, especialmente em contextos nos quais os riscos são imediatos e as soluções estruturais dependem de planejamento, recursos financeiros e prazos mais prolongados.

A literatura e os documentos institucionais revisados indicam que ações educativas tendem a produzir maior relevância quando são contínuas, territorializadas, multicanais e articuladas a medidas de fiscalização e engenharia de tráfego. Intervenções isoladas e episódicas podem contribuir para a sensibilização pontual, mas apresentam alcance limitado quando desvinculadas de uma política pública permanente. Por essa razão, a educação para o trânsito deve ser compreendida como componente integrado da segurança viária, e não apenas como campanha eventual associada a datas comemorativas.

No contexto de municípios turísticos de pequeno porte, a pertinência dessa estratégia decorre do descompasso entre a urgência dos riscos cotidianos e o tempo necessário à implementação de soluções estruturais mais robustas. Ações educativas dirigidas a motociclistas, motoristas, estudantes, trabalhadores do setor de entregas, turistas e usuários de veículos elétricos leves, ciclomotores e equipamentos de mobilidade individual autopropelidos podem atuar sobre a percepção de risco, a direção defensiva, o uso adequado de equipamentos de proteção, o respeito à velocidade compatível e a convivência segura nos principais corredores viários.

6. PROPOSTA EDUCATIVA DE CURTO PRAZO BASEADA NA MATRIZ DE HADDON

A proposta apresentada a seguir organiza-se a partir da matriz de Haddon, por compreender que a prevenção eficaz exige intervenção coordenada antes, durante e após o evento traumático. Seu objetivo é subsidiar ações educativas de rápida implementação voltadas à redução da exposição de motociclistas a situações de risco e à mitigação da gravidade dos sinistros, tomando Porto Belo (SC) como contexto de referência e considerando a possibilidade de adaptação a municípios turísticos com características semelhantes.

No plano operacional, recomenda-se a formação de arranjo intersetorial envolvendo o órgão municipal de trânsito, a secretaria de saúde, a guarda municipal, a polícia militar, o corpo de bombeiros, o Serviço de Atendimento Móvel de Urgência, escolas, empresas de entrega, representantes de trabalhadores motociclistas e instituições de ensino superior. A coordenação compartilhada é relevante para ampliar a legitimidade, a capilaridade e a continuidade das ações, além de permitir que as mensagens educativas sejam coerentes em diferentes espaços sociais e institucionais.

A atuação intersetorial também permite aproximar a educação para o trânsito de outras dimensões da política pública, como a vigilância em saúde, a prevenção de agravos, o ordenamento da circulação, a fiscalização orientativa, a comunicação pública e o planejamento urbano. Dessa forma, a proposta não se limita à realização de campanhas informativas, mas busca estruturar um processo contínuo de mobilização, orientação e acompanhamento dos principais fatores de risco associados à vulnerabilidade dos motociclistas.

A Figura 4 apresenta o fluxo operacional proposto para essa articulação, desde a formação do arranjo intersetorial até a implementação das ações educativas e seu posterior monitoramento.

Figura 4 — Fluxo operacional da proposta educativa de curto prazo



Fonte: Elaboração própria.

7. SÍNTESE DA PROPOSTA EDUCATIVA DE CURTO PRAZO

As ações situadas na fase pré-evento devem priorizar a prevenção da ocorrência dos sinistros, com ênfase na direção defensiva, no uso correto do capacete e de equipamentos de proteção, na manutenção básica da motocicleta, na percepção de risco em corredores congestionados, no respeito à velocidade compatível com o ambiente urbano e na atenção aos trechos críticos do sistema viário municipal. Nessa etapa, campanhas em redes sociais, intervenções em escolas, diálogo com empresas de entrega, abordagens educativas e utilização de painéis de mensagem variável podem reforçar mensagens curtas, contextualizadas e repetidas em períodos de maior exposição ao risco.

Na fase do evento, a dimensão educativa deve ser compreendida como preparação prévia voltada à mitigação da gravidade das lesões caso o sinistro ocorra. Demonstrações práticas sobre capacete devidamente afivelado, vestimenta de proteção, visibilidade do condutor, respeito à velocidade compatível e comportamento defensivo podem ser incorporadas a abordagens educativas em vias urbanas, escolas, empresas e espaços institucionais. O objetivo não é substituir a fiscalização, mas qualificá-la por meio de uma abordagem orientadora e pedagógica, capaz de associar controle, informação e corresponsabilização dos usuários da via.

Na fase pós-evento, a educação para o trânsito deve contemplar orientações sobre condutas seguras após a ocorrência, incluindo o acionamento célere dos serviços de emergência, a sinalização adequada do local, a preservação da segurança dos demais usuários da via e procedimentos básicos em ocorrências sem vítimas graves, inclusive quanto ao registro digital, quando disponível. Essa dimensão é relevante porque o gerenciamento inadequado do pós-sinistro pode ampliar danos, gerar novos conflitos viários, expor terceiros a riscos adicionais e dificultar a retomada segura da circulação.

A Figura 5 sintetiza a proposta educativa de curto prazo, organizada segundo as fases da matriz de Haddon e articulada aos principais eixos de intervenção preventiva.

Figura 5 — Síntese da proposta educativa de curto prazo para Porto Belo (SC)



Fonte: Elaboração própria com base em Haddo (1980).

8. DISCUSSÃO

A principal contribuição da proposta reside em sua aderência a contextos urbanos turísticos de pequeno porte, nos quais os gargalos viários são reconhecidos, mas a capacidade de resposta estrutural tende a ser condicionada por restrições orçamentárias, institucionais e temporais. Nessa conjuntura, a educação para o trânsito não deve ser compreendida como solução isolada para insuficiências de infraestrutura, mas como estratégia complementar de contenção de riscos no curto prazo, capaz de influenciar práticas cotidianas, ampliar a percepção social sobre a segurança viária e preparar o terreno para intervenções urbanas mais abrangentes.

A proposta também se mostra compatível com o paradigma do Sistema Seguro. Ao reconhecer que comportamentos inseguros não são fenômenos isolados, mas resultam da interação entre usuários, veículos, infraestrutura, regulação e ambiente urbano, a intervenção desloca o debate da mera culpabilização individual do condutor para uma lógica de corresponsabilidade entre Estado, instituições e sociedade. Essa perspectiva é especialmente relevante em municípios turísticos, nos quais a sazonalidade, a diversidade de usuários e a intensificação temporária dos fluxos viários exigem mensagens claras, reiteradas e territorialmente situadas.

No caso de Porto Belo, a utilização do município como contexto de referência permite ilustrar desafios presentes em outros territórios com características semelhantes, como crescimento urbano acelerado, pressão turística sazonal, corredores viários com capacidade limitada, coexistência de diferentes modais e maior exposição de motociclistas.

Assim, embora a proposta dialogue com condicionantes locais, sua estrutura analítica pode ser adaptada a outros municípios turísticos de pequeno porte que enfrentem problemas semelhantes de mobilidade e segurança viária.

Há, contudo, limitações importantes. Por se tratar de revisão narrativa com análise contextual, o estudo não apresenta base empírica própria para medir a distribuição espacial dos sinistros, caracterizar perfis epidemiológicos locais ou avaliar a efetividade das ações sugeridas. Além disso, programas educativos dependem de financiamento mínimo, coordenação entre órgãos, continuidade administrativa e manutenção de uma agenda pública permanente. Campanhas descontínuas, desarticuladas ou desvinculadas de estratégias de fiscalização, regulação e engenharia tendem a apresentar baixa capacidade de transformação.

Dessa forma, a proposta deve ser compreendida como etapa inicial de uma agenda mais ampla de segurança viária. Sua efetividade tende a aumentar quando acompanhada de monitoramento por indicadores simples e comparáveis, como o número de ações realizadas, o público alcançado, a adesão de escolas e empresas, a observação do uso adequado do capacete em pontos críticos, os registros de abordagens educativas, a percepção de risco dos usuários e a evolução das ocorrências nos períodos de maior fluxo. Em perspectiva de médio prazo, essas informações podem subsidiar intervenções estruturais mais precisas, orientar prioridades de fiscalização e fortalecer políticas públicas integradas de saúde, mobilidade e segurança viária.

9. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A segurança viária de motociclistas em municípios turísticos de pequeno porte exige uma abordagem integrada, sensível às especificidades territoriais e capaz de articular saúde pública, mobilidade urbana, educação, fiscalização e engenharia de tráfego. No caso de Porto Belo (SC), a combinação entre crescimento urbano, sazonalidade turística, saturação de corredores estratégicos, ampliação da circulação de motocicletas e presença crescente de veículos elétricos leves, ciclomotores e equipamentos de mobilidade individual autopropelidos evidencia que a mobilidade não constitui apenas uma questão operacional, mas um desafio relevante de gestão urbana e prevenção de agravos.

Nesse contexto, a educação para o trânsito apresenta-se como estratégia de curto prazo com potencial de aplicação imediata, especialmente por seu custo relativamente reduzido, sua capilaridade social e sua capacidade de alcançar diferentes públicos, como motociclistas, motoristas, estudantes, trabalhadores do setor de entregas, turistas e usuários de novos modais. Contudo, sua efetividade depende de continuidade, territorialização e articulação com medidas de fiscalização, comunicação pública, regulação e engenharia de tráfego, evitando que se limite a campanhas episódicas ou ações isoladas.

A proposta apresentada, estruturada com base na matriz de Haddon e orientada pelo paradigma do Sistema Seguro, permite compreender a vulnerabilidade

dos motociclistas como resultado da interação entre fatores humanos, veiculares, ambientais e institucionais. Dessa forma, desloca-se o enfoque da mera responsabilização individual para uma perspectiva de corresponsabilidade entre o poder público, as instituições e os usuários da via. Tal abordagem mostra-se especialmente pertinente em contextos turísticos, nos quais a sazonalidade, a heterogeneidade dos usuários e a pressão sobre a infraestrutura ampliam os conflitos viários e a exposição ao risco.

Conclui-se que Porto Belo pode se beneficiar de uma política educativa permanente, intersetorial e baseada em evidências, voltada à orientação de comportamentos, à comunicação de riscos e à proteção de usuários vulneráveis. Embora não substitua intervenções estruturais de médio e longo prazo, a educação para o trânsito pode funcionar como medida imediata de contenção de riscos, contribuindo para qualificar a convivência no espaço viário enquanto são planejadas soluções urbanas mais amplas.

Como limitação, destaca-se que este estudo não realizou levantamento estatístico primário de sinistros nem avaliação empírica da efetividade das ações propostas. Assim, recomenda-se que futuras pesquisas incorporem dados locais de ocorrências, análise espacial dos pontos críticos, percepção dos usuários e monitoramento de indicadores antes e depois da implementação das medidas educativas. Esses elementos podem fortalecer o planejamento municipal e subsidiar políticas públicas integradas de saúde, mobilidade e segurança viária em municípios turísticos de pequeno porte.

BIBLIOGRAFIA

Brasil. (1997, 23 de setembro). Lei nº 9.503, de 23 de setembro de 1997. Institui o Código de Trânsito Brasileiro. https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l9503compilado.htm

Brasil. (2018, 11 de janeiro). Lei nº 13.614, de 11 de janeiro de 2018. Cria o Plano Nacional de Redução de Mortes e Lesões no Trânsito (Pnatrans) e acrescenta dispositivo à Lei nº 9.503, de 23 de setembro de 1997. https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2015-2018/2018/lei/L13614.htm

Brasil. Conselho Nacional de Trânsito. (2023). Resolução CONTRAN nº 996, de 15 de junho de 2023. Dispõe sobre o trânsito, em via pública, de ciclomotores, bicicletas elétricas e equipamentos de mobilidade individual autopropelidos. https://www.gov.br/transportes/pt-br/assuntos/transito/conteudo-contran/resolucoes/Resolucao9962023.pdf

Brasil. Ministério da Saúde. Secretaria de Vigilância em Saúde e Ambiente. (2023). Cenário brasileiro das lesões de motociclistas no trânsito de 2011 a 2021. Boletim Epidemiológico, 54(6). https://www.gov.br/saude/pt-br/centrais-de-conteudo/publicacoes/boletins/epidemiologicos/edicoes/2023/boletim-epidemiologico-volume-54-no-06/

Brasil. Ministério dos Transportes. (2018). Plano Nacional de Redução de Mortes e Lesões no Trânsito (Pnatrans). https://www.gov.br/transportes/pt-br/assuntos/transito/pnatrans

Brasil. Polícia Rodoviária Federal. (2021). Educação para o trânsito. https://www.gov.br/prf/pt-br/seguranca-viaria/educacao-para-o-transito

Corgozinho, M. M., Montagner, M. Â., & Rodrigues, M. A. C. (2018). Vulnerabilidade sobre duas rodas: tendência e perfil demográfico da mortalidade decorrente da violência no trânsito motociclístico no Brasil, 2004-2014. Cadernos Saúde Coletiva, 26(1), 92-99.

Haddon, W., Jr. (1980). Advances in the epidemiology of injuries as a basis for public policy. Public Health Reports, 95(5), 411-421.

Porto Belo (SC). Prefeitura Municipal. (2025). Plano de Circulação Viária de Porto Belo 2023-2025: estratégias e soluções para otimizar a mobilidade urbana e promover a segurança no trânsito. https://portobelo.sc.gov.br/plano-de-circulacao-viaria-de-porto-belo-2023-2025-estrategias-e-solucoes-para-otimizar-a-mobilidade-urbana-e-promover-a-seguranca-no-transito/

Sharpin, A. B., Adriazola-Steil, C., Job, S., Obelheiro, M., Welle, B., Imamoglu, C. T., Bhatt, A., Liu, D., Lleras, N., & Luke, N. (2021). Low-Speed Zone Guide. World Resources Institute. https://doi.org/10.46830/wrigb.18.00063

Souza, C. D. F. de, Paiva, J. P. S. de, Leal, T. C., Silva, L. F. da, Santana, G. B. de A., Correia, D. S., Machado, M. F., Medronho, R. A., Santos, V. S., & Magalhães, M. de A. F. M. (2020). Mortality of motorcyclists due to traffic injuries in Brazil: a population-based study in Brazilian capitals. Revista da Associação Médica Brasileira, 66(10), 1355-1360. https://doi.org/10.1590/1806-9282.66.10.1355

World Bank. (2024). Guide for Safe Speeds: Managing Traffic Speeds to Save Lives and Improve Livability. World Bank. https://documents.worldbank.org/en/publication/documents-reports/documentdetail/099032224020526401

World Health Organization. (2021). Global Plan for the Decade of Action for Road Safety 2021-2030. https://www.who.int/publications/m/item/global-plan-for-the-decade-of-action-for-road-safety-2021-2030

World Health Organization. (2023a). Global status report on road safety 2023. https://www.who.int/teams/social-determinants-of-health/safety-and-mobility/global-status-report-on-road-safety-2023

World Health Organization. (2023b, 13 de dezembro). Road traffic injuries. https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/road-traffic-injuries

ARTICLE 7

MOTORCYCLE ROAD SAFETY IN RESORT TOWNS: A SHORT-TERM EDUCATIONAL INTERVENTION PROPOSAL BASED ON THE HADDON MATRIX

Deivid Ristow da Costa (Policia Militar)

RESUMO

Este artigo discute a educação para o trânsito como estratégia de curto prazo para a promoção da segurança viária de motociclistas em municípios turísticos de pequeno porte, marcados por crescimento urbano acelerado, sazonalidade populacional e pressão sobre a mobilidade urbana. Trata-se de estudo de abordagem qualitativa, de natureza analítico-reflexiva, fundamentado em revisão narrativa da literatura e em análise contextual de cenário urbano turístico. A discussão articula os referenciais do Sistema Seguro e da Matriz de Haddon com documentos normativos e institucionais relacionados à segurança viária, à mobilidade urbana e à educação para o trânsito. A análise evidencia que a vulnerabilidade dos motociclistas resulta da interação entre fatores humanos, veiculares e ambientais, sendo agravada por congestionamentos, disputas pelo espaço viário, circulação de veículos elétricos leves, ciclomotores e equipamentos de mobilidade individual autopropelidos, além de condutas de risco. Em contextos com essas características, intervenções estruturais tendem a demandar tempo, recursos e coordenação intersetorial, o que reforça a relevância de medidas educativas de rápida implementação. Propõe-se uma intervenção organizada segundo as fases do evento traumático, com ações em escolas, empresas, redes sociais, abordagens educativas e painéis de mensagem variável. Conclui-se que estratégias educativas contínuas, territorializadas e articuladas com a fiscalização e a engenharia de tráfego podem subsidiar ações intersetoriais de prevenção, contribuindo para a redução de agravos relacionados ao trânsito e para o fortalecimento de políticas públicas de saúde, mobilidade e segurança viária.

Palavras-chave: segurança viária; motociclistas; educação para o trânsito; matriz de Haddon; municípios turísticos; mobilidade urbana.

ABSTRACT

This article discusses traffic education as a short-term strategy for promoting motorcycle rider road safety in small tourist municipalities marked by rapid urban growth, population seasonality, and increasing pressure on urban mobility. This is a qualitative, analytical-reflective study based on a narrative literature review and contextual analysis of a tourist urban setting. The discussion articulates the Safe System approach and the Haddon Matrix with normative and institutional documents related to road safety, urban mobility, and traffic education. The analysis shows that motorcycle riders' vulnerability results from the interaction between human, vehicle-related, and environmental factors, aggravated by traffic congestion, disputes over road space, the circulation of light electric vehicles, mopeds, self-propelled mobility devices, and risk behaviors. In contexts with these characteristics, structural interventions tend to require time, resources, and intersectoral coordination, which reinforces the relevance of educational measures that can be rapidly implemented. The article proposes an intervention organized according to the phases of the traumatic event, including actions in schools, workplaces, social media, educational campaigns, and variable message signs. It concludes that continuous, territorialized educational strategies, when articulated with enforcement and traffic engineering, can support intersectoral prevention actions, contributing to the reduction of traffic-related injuries and to the strengthening of public policies on health, mobility, and road safety.

Keywords: road safety; motorcycle riders; traffic education; Haddon Matrix; tourist municipalities; urban mobility.

1. Introduction

Traffic accidents still today rank high among major public health and urban mobility management issues, as a leading cause of mortality, disability and avoidable injuries. On a global scale, more than half of traffic deaths occur among vulnerable users, such as pedestrians, cyclists, and motorcycle riders, thus highlighting the need for public policies sensitive to physical protection asymmetries on roads (World Health Organisation, 2023a, 2023b). In Brazil, injuries involving motorcycle riders account for a significant proportion of traffic morbidity and mortality rates, with direct ripple effects on emergency services, rehabilitation facilities, and public health oversight, inspection, or enforcement activities (Brazil, Ministry of Health, 2023). Furthermore, local studies indicate a clear uptrend in mortality and vulnerability associated with motorcycle use, underscoring the key role held by this group in traffic injury prevention agendas (Corgozinho, Montagner, & Rodrigues, 2018; Souza et al., 2020). The Brazilian Traffic Code establishes road safety and traffic education as duties for governments and communities, steering traffic system arrangements and road user training (Brassil, 1997), together with policies covering both healthcare and accident prevention, while protecting life under the aegis of Brazil's Unified National Health System (SUS).

In small resort towns, road safety takes on specific contours. Rapid urban growth, expanding vehicle fleets, seasonally intensive economic activities, and periodic inflows of visitors pump up pressures on often limited road infrastructure. This context stirs up conflicts among different transport modes, especially in downtown areas, on access roads, along commercial corridors, and in regions where services are more tightly clustered. Such characteristics may be noted in many urban contexts with similar profiles throughout Brazil, where mobility management faces challenges related to seasonality, road network constraints, and the need to reconcile normal local traffic with visitor inflows, while ensuring user safety for all.

In this context, motorcycle riders play a key role. Combining agility with low relative costs, motorcycles are widely used for daily commutes and work activities. However, their riders are extremely vulnerable, as limited structural protection steps up their chances of being seriously injured in traffic accidents. Moreover, factors such as traveling between vehicles, fast performance pressures, poor risk perceptions, reckless behaviours, and sharing saturated roads make the exposure of this group even worse. More recently, the introduction light electric vehicles into urban settings, including mopeds, and self-propelled individual mobility equipment is adding new layers of complexity to regulatory and oversight, inspection, or enforcement activities intended to ensure safe co-existence on roads, especially in view of the need for compliance with the Brazilian standards governing their use on public roads (Brassil, National Traffic Council, 2023).

Although structural interventions – such as road upgrades, restructuring vehicle flows, installing traffic control devices, and adapting urban infrastructure – are vital for sustained risk reductions, these steps require technical planning, funding, and intersectoral coordination, with lengthy implementation times. Meanwhile, educational strategies can play a leading role as short-term stopgaps, especially when guided by contextual diagnoses and coordinated with oversight, inspection, or enforcement activities and traffic engineering actions. Through this approach, traffic education is not limited

to merely conveying information, but can instead focus on risk perceptions, individual attitudes, daily practices, and joint responsibility among different types of road users.

Within this context, this paper explores traffic education as a short-term road safety promotion strategy for motorcycle riders in small towns that depend heavily on tourism. For this purpose, Porto Belo in Santa Catarina is selected as a reference, in view of its resort town characteristics, with seasonal pressures on urban mobility and challenges raised by the need to protect vulnerable road users. This analysis underpins the proposal of a set of territorialised educational actions, with the potential full adaptation to similar municipal contexts, based on Safe System and Haddon Matrix benchmarks.

By focusing on the traffic management field, this analysis strives to contribute to discussions of road safety educational strategies applicable to small resort towns that are largely dependent on tourism, especially with heavy motorcycle traffic, seasonal population swings, and co-existence between different modes of transport.

2. Methodology

Using a qualitative approach, this study presents an analytical and reflective narrative review, supplemented by a contextual analysis of a small resort town, selecting the Porto Belo municipality in Santa Catarina State as an empirical benchmark. This design is intended to interconnect theoretical references, regulatory documents, and local elements related to road safety, motorcycle rider vulnerability, and traffic education, with no intention of producing causal inferences, primary epidemiological estimates, or impact assessments of previous interventions.

The data search was conducted through academic search engines in scientific databases, including SciELO, PubMed, and Google Scholar, as well as institutional and regulatory documents released by government departments related to road safety, health, urban mobility, and traffic education. The following descriptors were used in Portuguese, separately and in combination: "road safety", "motorcycle riders", "traffic education", "Safe System", "Haddon matrix" and "urban mobility", as well as their English and Spanish counterparts, when relevant.

Official and institutional documents were also analysed, including the Brazilian Traffic Code, the National Traffic Deaths and Injuries Reduction Plan, technical materials issued by the Federal Highway Police, regulatory documents released by the National Traffic Council, and municipal documents related to urban planning, road traffic flows and mobility in Porto Belo. The inclusion of these documents is intended to link general road safety references to material constraints commonly observed in small resort towns, characterised by seasonal population swings, heavier traffic flows, and pressures on urban infrastructures.

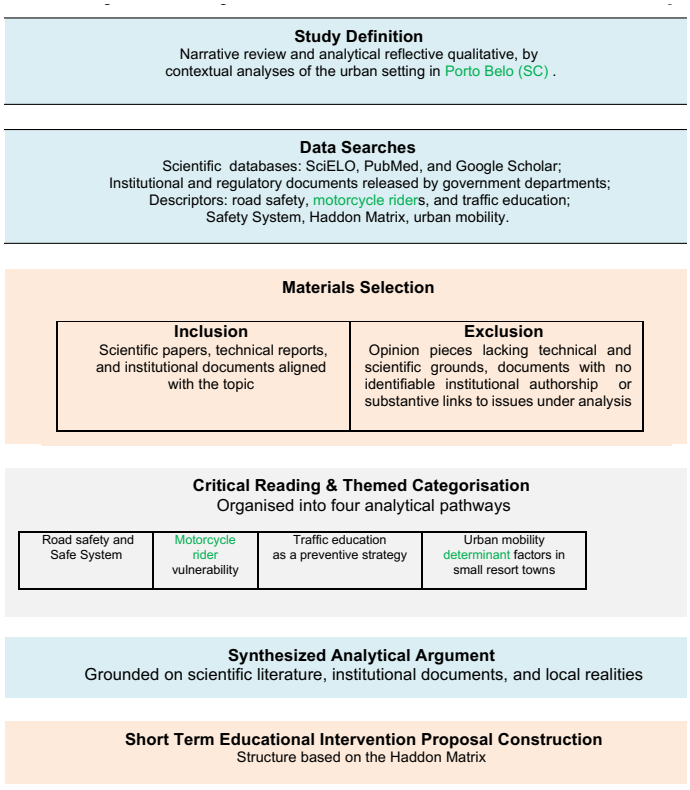
Scientific papers, technical reports, regulatory documents, and institutional materials were included, when directly addressing issues related to road safety, motorcycle rider vulnerability, traffic injury prevention, traffic education, and urban mobility in municipal contexts. Materials published in Portuguese, English, or Spanish were considered, excluding opinion pieces lacking technical and scientific grounds, documents with no identifiable institutional authorship, and publications without

substantive links to the issues under analysis, together with materials that did not contribute to the construction of the analytical framework or educational proposal.

The materials were analysed through critical perusal and themed categorisation, organised into four analytical pathways: road safety and the Safe System model; motorcycle rider vulnerability; traffic education as a preventive strategy; and urban mobility determinant factors in small resort towns. Based on this overview, a proposal based on the Haddon matrix was drawn up, listing short-term educational interventions and actions targeting the moments before, during, and after traumatic road events.

The findings should be interpreted as a synthesised analytical argument grounded on scientific literature, institutional documents, and contextual analyses of the context under examination. Consequently, this study does not constitute a primary statistical survey of traffic accidents in this municipality, and neither does it assess the effectiveness of any public policies already in place. Figure 1 presents an overview of the analytical chain adopted for this study, from the methodology design definition through to the educational intervention proposal construction.

Figure 1 – Analytical Study Chain and Educational Intervention Proposal Construction



Source: prepared by the author, based on the methodological development of the study.

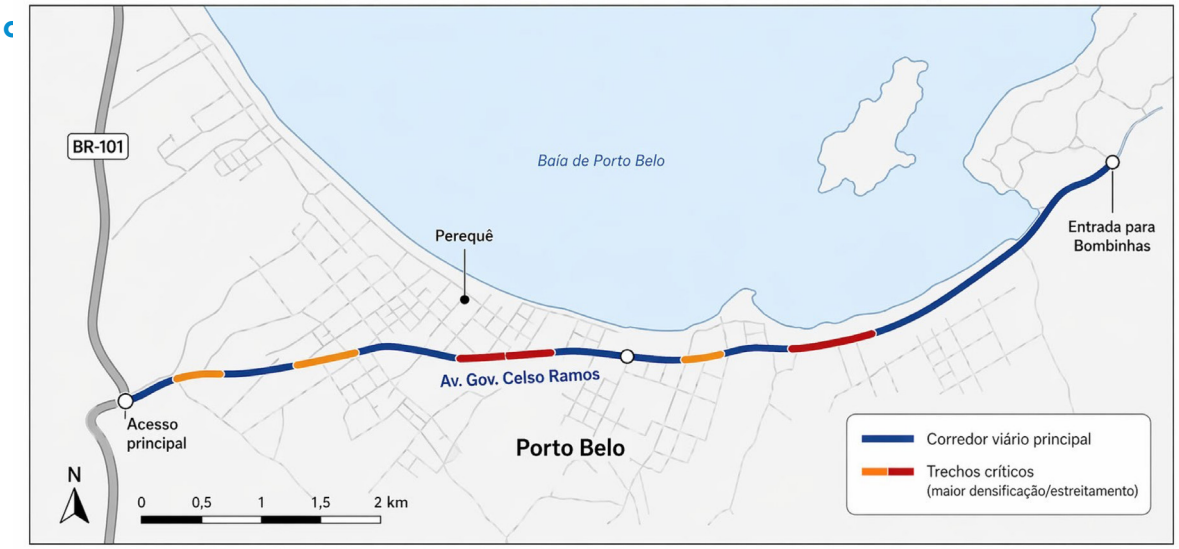
3. LOCAL ROAD SAFETY CONSTRAINTS IN A SMALL RESORT TOWN: CASE STUDY OF PORTO BELO (SC)

Located in Santa Catarina State (SC), Southern Brazil, Porto Belo provides an appropriate context for analysing road safety in small resort towns, due to a combination of urban expansion, population growth, real estate appreciation, and strong seasonal appeal. In this setting, urban mobility is no longer just an operating aspect of traffic flows; instead, it becomes a broader part of the urban planning and management agenda. The Porto Belo Road Traffic Plan acknowledges this context by identifying structural bottlenecks, proposing flow reorganisations, and stressing the need for steps intended to streamline traffic flows and road safety, especially along busier and more important corridors (Porto Belo, 2025).

Notable among these corridors is the Avenida Governador Celso Ramos, a structuring thoroughfare that links downtown areas together, as well as local access routes and urban sprawl extending out towards the neighbouring Bombinhas municipality. Along narrower and more densely populated segments, associations among high vehicle volumes, frequent off-ramps and turning lanes, strip malls, pedestrian crossings, and seasonal traffic surges create settings more conducive to road conflicts. In these contexts, motorcycles may serve as functional alternatives for shortening trip times by weaving through traffic jams. However, this also increases exposure to risky manoeuvres, cutting across lanes packed with vehicles, and more unstable traffic operation situations.

Figure 2 presents a cartographic representation that schematically illustrates Avenida Governador Celso Ramos corridor between the main access ramp leading to the BR-101 highway and the slip road turning off to Bombinhas, indicating the most critical segments for heavy traffic and narrower lanes.

Figure 2 – Cartographic representation schematically illustrating the Avenida Governador Celso Ramos



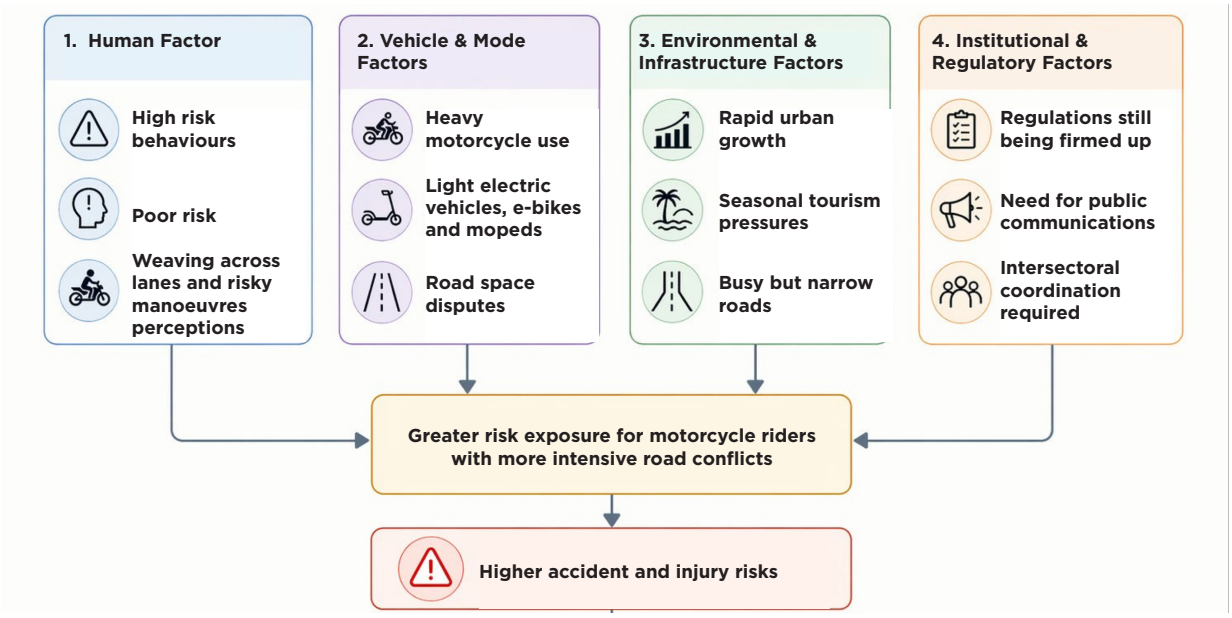
Source: prepared by the author, based on support map references

In addition to structural constraints, the daily traffic patterns in urban areas also suggest the presence of behaviours potentially associated with higher road risks, such as risky motorcycle manoeuvres, traffic flows incompatible with urban surroundings, and practices guided by low risk perceptions. Although this study does not have its own empirical grounds for measuring the frequency or distribution of such behaviours, their recurrent presence in public and institutional discussions under schools the importance of preventive interventions targeting behavioural aspects of road safety.

Another recent element addresses the upsurge in light electric vehicle use, particularly mopeds, and self-propelled individual mobility equipment. Their rising presence on public roads is beginning to demand more regulatory and educational attention from municipalities, with stronger oversight, inspection, or enforcement, under guidelines issued in 2023 by the National Traffic Council (Brazil, National Traffic Council, 2023). The arrival of these transport options in road spaces that are already overstressed, often without clear lane definition, urban infrastructure adaptation, or even adequate user guidance, is ushering in a new set of factors triggering conflicts between different modes of transport. In small resort towns, this phenomenon tends to be particularly significant, pumping up seasonal traffic flows with more heterogeneous user profiles, while current infrastructure constraints remain unchanged.

From this standpoint, road safety in Porto Belo does not depend only on physical road capacity expansion or structural interventions. This field also requires governance abilities, intersectoral coordination, regulation, public communications, and traffic education. Based on this understanding, Figure 3 summarises the main local determinant factors that contribute to motorcycle rider vulnerability, listed by analytical logic, using the Haddon matrix.

Figure 3 - Local determining factors for motorcycle rider vulnerability in Porto Belo (SC) according to Haddon Matrix logic



Source: prepared by the authors

4. ROAD SAFETY, SAFE SYSTEM AND MOTORCYCLE RIDER VULNERABILITY

Road safety may be understood as a set of policies, devices, practices, and institutional arrangements designed to prevent traffic deaths and serious injuries. In contemporary approaches, there is a shift away from approaches centred solely on individual fault, instead placing heavier emphasis on systemic risks, where road designs, speeds, vehicles, user behaviours, regulations, and post-accident responses all interact to produce outcomes. Brussels National Traffic Deaths and Injuries Reduction Plan converges with international literature by acknowledging that human error is predictable and traffic systems must be designed to absorb flaws and faults, without necessarily converting them into deaths or serious injuries. This approach is aligned with the 2021-2030 Global Plan for the Decade of Action for Road Safety, as well as the Safe System paradigm (Brazil, 2018; World Health Organisation, 2021, 2023a).

In this context, the Safe System paradigm is particularly relevant. Its assumptions encompass safer roads, appropriate speeds, safe vehicles, protected users, and efficient post-accident responses. Speed plays a structuring role, as it is a determinant factor for accident probability and resulting injury severity. In urban areas with mixed traffic flows and vulnerable users, environmentally appropriate speed management is acknowledged as a core element for saving lives, lessening accident severity, and enhancing urban liveability (Sharpin et al., 2021; World Bank, 2024). For motorcycle riders, this relationship is even more critical, due to lower vehicle stability, with less physical protection and direct exposure to impacts.

In this situation, the Haddon matrix offers a useful analytical tool for breaking down factors associated with traffic accidents. By organising these risk elements into human, vehicular, and environmental dimensions, divided into pre-event, event and post-event phases, this model offers a deeper understanding of traffic accidents as processes, rather than stand-alone outcomes. This approach fosters the formulation of preventive and integrated policies, especially in complex urban contexts where behaviours, road designs, regulations, oversight, inspection, or enforcement activities and emergency care mutually influence each other (Haddon, 1980).

For motorcycle riders, vulnerability stems precisely from these interactions among factors. The human aspect includes behaviours such as speeding, lack of attention, alcohol consumption, low risk perception, inadequate use of protective equipment, and efforts to travel faster through stalled traffic. In the vehicular dimension, aspects such as inadequate maintenance, worn tyres and brakes, poor street-lighting, and careless helmet use are particularly noteworthy. The environmental dimension includes surface irregularities, insufficient signage, unsafe road designs, sand or other wastes on roads, clashes with pedestrians, and disorderly relationships among different modes of transport.

In small towns that depend heavily on tourism, these factors tend to be pumped up by seasonal visitor flows with more heterogeneous road users. Residents, workers, delivery people, visitors, and drivers unfamiliar with the urban fabric share critical corridors during periods when traffic flows are heavier. At the same time, expanding use of light electric vehicles, mopeds, and self-propelled individual mobility equipment is adding new challenges to safe co-existence on the road, particularly when regulatory, institutional, and infrastructural adaptations are still struggling to catch up with this trend (Brassil, National Traffic Council, 2023). This context underscores the importance of educational, regulatory, and operating strategies designed to curtail risk exposure, while providing better protection for vulnerable users.

5. TRAFFIC EDUCATION AS A SHORT-TERM STRATEGY

In Brazil's legal system, traffic education is firmly entrenched in the regulations. The Brazilian Traffic Code requires its promotion at all educational levels and through community actions, while institutional road safety documents acknowledge it as a preventive tool for changing behaviours, humanising traffic, and assigning shared responsibilities to road users (Brassil, 1997; Brazil, Federal Highway Police, 2021).

In terms of public management, traffic education is endowed with strategic potential, blending social capillarity with relatively low costs, while also easier to implement than large-scale structural interventions. This does not mean it can replace engineering actions, oversight, inspection, or enforcement activities, or urban upgrades; instead, it acts in complementary ways, especially in contexts where risks are immediate but structural solutions depend on planning and funding, with longer lead times.

The reviewed institutional documents and literature indicate that educational actions tend to produce better outcomes when they are continuous, territorialised, multichannel, and linked to oversight, inspection, or enforcement activities and traffic engineering measures. Although episodic stand-alone interventions may contribute to location-specific awareness, their scope is limited when unconnected to permanent public policies. This is why traffic education should be viewed as an integrated component of road safety programmes, rather than consisting merely of sporadic campaigns tied to commemorative dates.

In the context of small resort towns, the relevance of this strategy stems from the mismatch between the urgency of everyday risks and the lead-times needed to implement more robust structural solutions. Educational actions targeting motorcycle riders, drivers, students, delivery workers, tourists, and users of light electric vehicles, mopeds and self-propelled individual mobility equipment can focus effectively on risk perception, defensive driving, appropriate protective equipment, respect for appropriate speeds, and safe co-existence along major thoroughfares.

6. SHORT-TERM EDUCATIONAL PROPOSAL BASED ON THE HADDON MATRIX

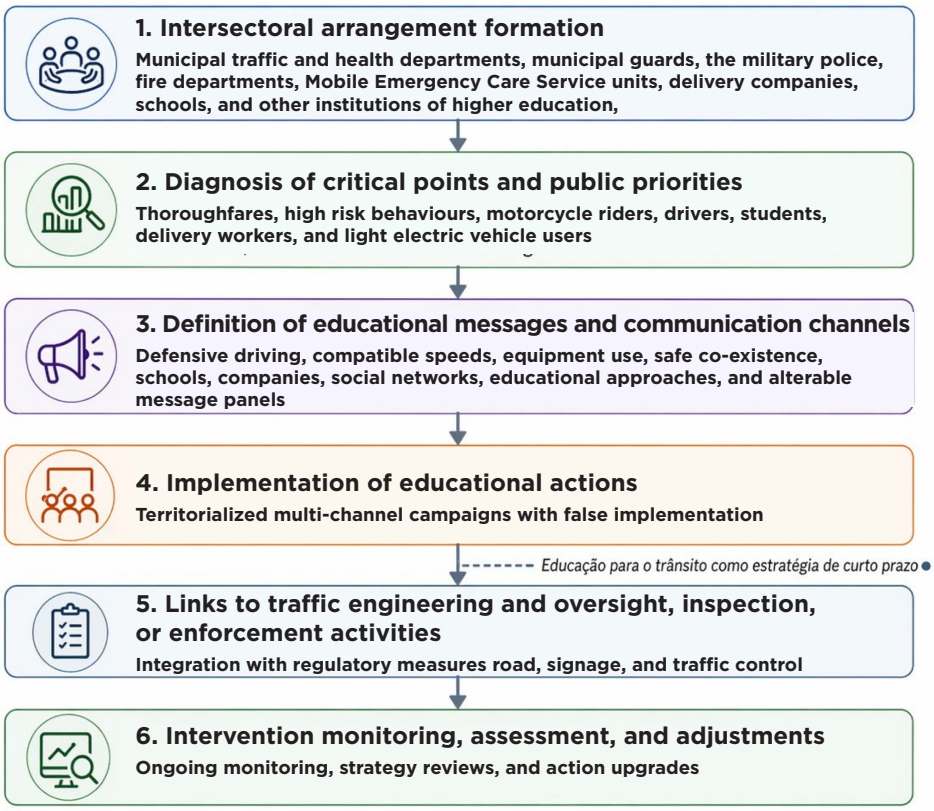
The proposal presented below is based on the Haddon matrix, assumes that effective road accident prevention requires coordinated interventions before, during and after traumatic events. Its purpose is to provide input for fast-tracked educational actions designed to lessen exposure to high risk situations among motorcycle riders, while also mitigating accident severity. The resort town of Porto Belo in Santa Catarina State is used as a benchmark, while also exploring adaptation possibilities for similar towns that are also heavily dependent on tourism.

At the operating level, an intersectoral approach is recommended, encompassing municipal traffic and health departments, municipal guards, the military police and fire departments, Mobile Emergency Care Service units, schools, other institutions of higher education, and delivery companies, as well as motorcycle worker representatives. Shared coordination is crucial for firming up action legitimacy, capillarity and continuity, while also ensuring that educational messages are coherent in many different social and institutional spaces.

Intersectoral actions also bring traffic education closer to other public policy fields, such as public health oversight, inspection, or enforcement, accident prevention, traffic planning and urban design, as well as guidance and other public communications. Not limited to just informative campaigns, this proposal instead strives to structure a continuous mobilisation and guidance process, monitoring major risk factors associated with motorcycle rider vulnerability.

Figure 4 presents the operating flow proposed for this approach, from the initial intersectoral arrangements through to the deployment of educational actions and their subsequent monitoring.

Figure 4 – Operating flowsheet of short-term educational proposal



Source: prepared by the authors

7. SUMMARY OF THE SHORT-TERM EDUCATIONAL PROPOSAL

Actions during the pre-event phase should prioritise accident prevention, with emphasis on defensive driving, the correct helmet use, wearing protective equipment, basic motorcycle maintenance, risk perceptions on busy thoroughfares, respect for speeds compatible with urban surroundings, and extra alertness along critical segments of municipal road systems. At this stage, social media campaigns, interventions in schools, dialogues with delivery companies, educational approaches, and alterable message panels can spotlight brief, contextualised messages that are repeated frequently during higher risk exposure periods.

During the event phase, educational aspects should be viewed as prior preparation designed to mitigate injury severity caused by accidents. Practical demonstrations of properly buckled helmets, protective clothing, driver visibility, respect for appropriate speeds, and defensive driving behaviours can all be folded into educational approaches on urban roads, as well as in schools, companies, and institutional spaces. The intention here is not to replace oversight, inspection, or enforcement activities, but to upgrade them through a teaching and guiding approach that highlights information with road user controls and joint responsibilities.

In the post-event phase, traffic education should include guidance on safe conduct after these occurrences, including rapid activation of emergency services, adequate site signage, preserving the safety of other road users, and basic procedures for occurrences without serious victims, including digital registration, when available. This aspect is important, because inadequate post-accident management can amplify damage and cause further road conflicts, exposing parties to additional risks while hindering the restoration of safe traffic flows.

Figure 5 summarises the short-term educational proposal, organised into Haddon matrix phases and links to major preventive intervention options.

Figure 5 – Overview of short-term educational proposal for Porto Belo (SC) presented in Haddon Matrix phases



Source: prepared by the authors, based on the Haddon Matrix (1980)

8. DISCUSSION

The main contribution of this proposal lies in its adherence to small-scale urban tourist contexts, where traffic bottlenecks are acknowledged, but structural response capabilities are dependent on budgetary, institutional and temporal constraints. In this context, traffic education should not be seen as a stand-alone solution for inadequate infrastructures, but rather as a complementary short-term risk containment strategy that could influence daily practices, expanding social perceptions of road safety and paving the way for more comprehensive urban interventions.

This proposal is also compatible with the Secure System paradigm. By acknowledging that unsafe behaviours are not stand-alone phenomena, but are instead the outcomes of interactions among users, vehicles, infrastructures, regulations, and urban environments, interventions shift focus: instead of merely blaming individual drivers, they pursue a logic of joint responsibility shared by the State, institutions, and society. This approach is particularly relevant in towns that are heavily dependent on tourism, where seasonal visitor inflows result in heavier traffic and more user diversity, requiring clear, reiterated, and territorially situated messages.

The selection of Porto Belo as a benchmark context helps illustrate challenges found in other towns with similar characteristics, including rapid urban growth, seasonal tourist pressures, thoroughfares with limited capacities, co-existence of different modes of transport, and greater risk exposure for motorcycle riders. Although this proposal addresses local constraints, its analytical structure can be easily adapted to other small resort towns that face similar mobility problems and road safety issues.

However, there are some significant limitations. As a narrative review with a contextual analysis, this study lacks empirical grounds for measuring the spatial distribution of accidents; it does not characterise local epidemiological profiles, nor assess the effectiveness of the suggested actions. Moreover, educational programmes require minimal funding levels and inter-departmental coordination efforts, administrative continuity, and ongoing public agendas. Spotty campaigns unconnected to oversight, inspection, or enforcement activities or regulation and engineering strategies tend to have low transformation capacities.

This proposal should consequently be seen as an initial step in a broader road safety agenda. Its effectiveness tends to increase when accompanied by monitoring through simple but comparable indicators, such as numbers of actions, publics reached, adherence of schools and companies, observations of the proper helmet use at critical points, educational approach records, risk perceptions among users, and rush hour accident rates. Over the medium term, this information can provide input for more precise structural interventions, guiding priorities, and buttressing integrated public policies focused on health, mobility, and road safety.

9. CLOSING REMARKS

Road safety for motorcycle riders in small resort towns requires integrated approaches that are sensitive to local requirements and able to interconnect public health, urban mobility, education, oversight, inspection, or enforcement, and traffic engineering activities. In Porto Belo (SC), a blend of urban growth, seasonal visitor flows, saturated strategic thoroughfares, heavier motorcycle traffic, and the upsurge in light electric vehicles, mopeds and self-propelled individual mobility equipment rank mobility as not only an operating issue, but rather a major urban management and accident prevention challenge.

In this context, traffic education offers a short-term strategy with potential for immediate deployment, at relatively low costs, thanks to its social capillarity and power to reach out directly to many different audiences, including motorcycle riders, drivers, students, delivery workers, tourists, and riders opting for new modes of transport. However, its effectiveness depends on its continuity and territorialisation, with links to oversight, inspection, or enforcement, public communication, regulation, and traffic engineering measures that would extend its scope beyond episodic campaigns or once-off actions.

Structured on the Haddon matrix and guided by the Safe System paradigm, this proposal offers an in-depth understanding of motorcycle rider vulnerability resulting from interactions among human, vehicular, environmental and institutional factors. This shifts the focus away from mere individual responsibility, instead moving towards approaches grounded on joint responsibilities shared by governments, institutions and road users. Such a line of attack is particularly pertinent in tourism contexts with heterogeneous users resulting from seasonal visitor flows, while infrastructure pressures ratchet up risk exposures and road conflicts.

This leads to the conclusion that Porto Belo could benefit from a permanent, intersectoral and evidence-based educational policy, designed to guide behaviours, highlight risks, and protect vulnerable users. Although this would not replace medium and long-term structural interventions, traffic education serves effectively as an immediate risk curtailment step, fostering less conflictive co-existence in road spaces while broader urban solutions are planned.

A notable limitation is that this study did not conduct a primary statistical survey of traffic accidents, and lacks an empirical assessment of the effectiveness of the proposed actions. It is thus recommended that future studies include local data on occurrences, with spatial analyses of critical points and user perceptions, monitoring indicators before and after the implementation of educational measures. These elements could strengthen municipal planning and provide input for integrated public policies addressing health, mobility, and road safety in small resort towns that are heavily dependent on tourism.

BIBLIOGRAPHY

Brazil. (1997, September 23). Lei nº 9.503, de 23 de setembro de 1997. Institui o Código de Trânsito Brasileiro. Https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l9503compilado.htm

Brazil. (2018, January 11). Lei nº 13.614, de 11 de janeiro de 2018. Cria o Plano Nacional de Redução de Mortes e Lesões no Trânsito (Pnatrans) e acrescenta dispositivo à Lei nº 9.503, de 23 de setembro de 1997. https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2015-2018/2018/lei/L13614.htm

Brazil. Conselho Nacional de Trânsito. (2023). Resolução CONTRAN nº 996, de 15 de junho de 2023. Dispõe sobre o trânsito, em via pública, de ciclomotores, bicicletas elétricas e equipamentos de mobilidade individual autopropelidos. https://www.gov.br/transportes/pt-br/assuntos/transito/conteudo-contran/resolucoes/Resolucao9962023.pdf

Brazil. Ministério da Saúde. Secretaria de Vigilância em Saúde e Ambiente. (2023). Cenário brasileiro das lesões de motociclistas no trânsito de 2011 a 2021. Boletim Epidemiológico, 54(6). https://www.gov.br/saude/pt-br/centrais-de-conteudo/publicacoes/boletins/epidemiologicos/edicoes/2023/boletim-epidemiologico-volume-54-no-06/

Brazil. Ministério dos Transportes. (2018). Plano Nacional de Redução de Mortes e Lesões no Trânsito (Pnatrans). https://www.gov.br/transportes/pt-br/assuntos/transito/pnatrans

Brazil. Polícia Rodoviária Federal. (2021). Educação para o trânsito. https://www.gov.br/prf/pt-br/seguranca-viaria/educacao-para-o-transito

Corgozinho, M. M., Montagner, M. Â., & Rodrigues, M. A. C. (2018). Vulnerabilidade sobre duas rodas: tendência e perfil demográfico da mortalidade decorrente da violência no trânsito motociclístico no Brasil, 2004-2014. Cadernos Saúde Coletiva, 26(1), 92-99.

Haddon, W., Jr. (1980). Advances in the epidemiology of injuries as a basis for public policy. Public Health Reports, 95(5), 411-421.

Porto Belo (SC). Prefeitura Municipal. (2025). Plano de Circulação Viária de Porto Belo 2023-2025: estratégias e soluções para otimizar a mobilidade urbana e promover a segurança no trânsito. https://portobelo.sc.gov.br/plano-de-circulacao-viaria-de-porto-belo-2023-2025-estrategias-e-solucoes-para-otimizar-a-mobilidade-urbana-e-promover-a-seguranca-no-transito/

Sharpin, A. B., Adriazola-Steil, C., Job, S., Obelheiro, M., Welle, B., Imamoglu, C. T., Bhatt, A., Liu, D., Lleras, N., & Luke, N. (2021). Low-Speed Zone Guide. World Resources Institute. https://doi.org/10.46830/wrigb.18.00063

Souza, C. D. F. de, Paiva, J. P. S. de, Leal, T. C., Silva, L. F. da, Santana, G. B. de A., Correia, D. S., Machado, M. F., Medronho, R. A., Santos, V. S., & Magalhães, M. de A. F. M. (2020). Mortality of motorcyclists due to traffic injuries in Brazil: a population-based study in Brazilian capitals. Revista da Associação Médica Brasileira, 66(10), 1355-1360. https://doi.org/10.1590/1806-9282.66.10.1355

World Bank. (2024). Guide for Safe Speeds: Managing Traffic Speeds to Save Lives and Improve Livability. World Bank. https://documents.worldbank.org/en/publication/documents-reports/documentdetail/099032224020526401

World Health Organization. (2021). Global Plan for the Decade of Action for Road Safety 2021-2030. https://www.who.int/publications/m/item/global-plan-for-the-decade-of-action-for-road-safety-2021-2030

World Health Organization. (2023a). Global status report on road safety 2023. https://www.who.int/teams/social-determinants-of-health/safety-and-mobility/global-status-report-on-road-safety-2023

World Health Organization. (2023b, 13 de dezembro). Road traffic injuries. https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/road-traffic-injuries

FGV TRANSPORTES

https://transportes.fgv.br