# INFRAESTRUTURAS NO TERRITÓRIO:
Planejamento, Resiliência e Adaptabilidade Climática

# INFRASTRUCTURE IN THE TERRITORY:
Planning, Resilience and Climate Adaptability

JEFERSON TAVARES
ORG.

**Universidade de São Paulo**
REITOR | Aluisio Augusto Cotrim Segurado
VICE-REITORA | Liedi Légi Bariani Bernucci

**Instituto de Arquitetura e Urbanismo**
DIRETOR | João Marcos de Almeida Lopes
VICE-DIRETORA | Akemi Ino

**INFRA – Investigações em Infraestrutura: Natureza, Formas, Redes e Ambiente Urbano**
ORGANIZADOR | Jeferson Tavares
REVISÃO | Victória Albuquerque Silva - Comunica
TRADUÇÃO| Victória Albuquerque Silva - Comunica
PROJETO GRÁFICO E DIAGRAMAÇÃO | Joaquim Olímpio - Comunica

DADOS INTERNACIONAIS DE CATALOGAÇÃO NA PUBLICAÇÃO (CIP)
(CÂMARA BRASILEIRA DO LIVRO, SP, BRASIL)

Infraestruturas no território [livro eletrônico] : planejamento, resiliência e adaptabilidade climática = Infrastructure in the territory : planning, resilience and climate adaptability / Jeferson Tavares, org. -- Brasília, DF : Agência Comunica, 2026.
PDF

Ed. bilíngue: português/inglês.
ISBN 978-65-990484-5-6

DOI: 10.66949/c0m520nc

1. Engenharia de transportes 2. Infraestrutura urbana 3. Transportes - Planejamento I. Tavares, Jeferson. II. Título: Infrastructure in the territory : planning, resilience and climate adaptability.

26-361702.0 CDD-629.04

**Índices para catálogo sistemático:**
1. Engenharia de transportes 629.04

Eliete Marques da Silva - Bibliotecária - CRB-8/9380

*"Esta obra é de acesso aberto. É permitida a reprodução parcial ou total desta obra, desde que citada a fonte e a autoria e respeitando a Licença Creative Commons indicada"*

1ª edição – Ano 2026

Copyright©

Direitos autorais protegidos pela Lei nº 9.610, de 19 de fevereiro de 1998. Esta obra é de acesso aberto e está licenciada sob a Licença Creative Commons Atribuição-Não Comercial-CompartilhaIgual 4.0 Internacional (CC BY-NC-SA 4.0).

É permitida a reprodução parcial ou total, desde que citadas a fonte e a autoria, sem fins comerciais e com compartilhamento pela mesma licença. Qualquer uso não previsto na licença depende de autorização prévia e expressa da Comunica – Agência de Comunicação Ltda.

Editora:

comunica

COMUNICA - Agência de Comunicação Ltda | Telefone: (61) **99351-5465** | (61) 98235-5966
E-mail: atendimento.agenciacomunica@gmail.com | www.**agenciacomunica**.com.br

# INFRAESTRUTURAS NO TERRITÓRIO:
Planejamento, Resiliência e Adaptabilidade Climática

# INFRASTRUCTURE IN THE TERRITORY:
Planning, Resilience and Climate Adaptability

JEFERSON TAVARES
ORG.

N.º Registro DOI: 10.66949/c0m520nc

**República Federativa do Brasil** | *Federative Republic of Brazil*

Luiz Inácio Lula da Silva
*Presidente* | *President*

**Ministério dos Transportes** | *Ministry of Transport*

George André Palermo Santoro
*Ministro* | *Minister*

Bruno Praxedes
*Secretário Executivo* | *Executive Secretary*

Cloves Eduardo Benevides
*Subsecretário de Sustentabilidade* | *Undersecretary for Sustainability*

**Coordenação Técnica Executiva** | *Executive Technical Coordination*

George Yun
*Coordenador-Geral de Projetos Especiais e Mudança do Clima* |
*General Coordinator of Special Projects and Climate Change*

**Equipe Técnica e Colaboradores** | *Technical Team and Collaborators*

Ana Paula M. A. Cunha
Andréa Souza Santos
Beatriz Kopperschmidt de Oliveira
Érico Rocha
Felipe Fernandes Queiroz
Fernando Barbelli Feitosa
Gabriel Dalla Rosa Carvalho
George Yun
Inamara Mêlo
Jeancarlo Alberto dos Reis
Jeferson Tavares
Jefferson Vasconcelos Santos
Leandro Eustáquio Tito Muniz
Lidiane Cristina Oliveira Costa
Luiza Carvalho Tereza
Márcia Regina Guimarães Guedes
Marília Gaspar de Souza Lima
Nelson P. A. Mateus
Ricardo Luiz Medeiros Meirelles
Rodolfo Gomes Benevenuto
Sarah de Andrade e Andrade
Suellen Roballo Fischer

Thiago Olante Casagrande
Thiago Pizzo Scatena
Venerando Eustáquio Amaro

**Comitê Editorial** | *Editorial Committee*

Jeferson Tavares
*Organizador* | *Organizer*

George Yun
*Coordenador* | *Coordinator*

*Membros* | *Members:*
George Yun
Ricardo Luiz Medeiros Meirelles
Jeancarlo Alberto dos Reis

**Equipe Revisora** | *Revision Team*

Ricardo Luiz Medeiros Meirelles
Victória Albuquerque Silva - Comunica

**Equipe Editorial** | *Editorial Team*

Taymara Santos - Comunica
*Coordenadora de produção editorial* | *Editorial Production Coordinator*

Daniele Soraia Brito - Comunica
*Assistente de Produção Editorial* | *Editorial Production Assistant*

Joaquim Olímpio - Comunica
*Projeto Gráfico e Capa* | *Layout and Cover*

Iara Ferreria - Comunica
*Diagramação* | *Graphic Design*

**Conselho Editorial Científico** | *Scientific Editorial Board*

Antonio Soukef Junior
Carolina Pescatori Candido da Silva
James Shoiti Miyamoto
João Marcos de Almeida Lopes
Tamms Maria da Conceição Morais Campos

**Colaboração** | *Collaboration*

Ministério dos Transportes | *Ministry of Transport*
Instituto de Arquitetura e Urbanismo da USP |
*Institute of Architecture and Urbanism at USP*

# PALAVRAS DO MINISTRO

O setor de transportes terrestres constitui, inquestionavelmente, um alicerce fundamental para o progresso econômico e a coesão social do Brasil. Ao conectar pessoas, bens e regiões, ele impulsiona o desenvolvimento e fortalece a integração nacional. Contudo, esse setor enfrenta desafios significativos diante das mudanças climáticas globais. Fenômenos extremos, como chuvas intensas, secas prolongadas e elevação do nível do mar, aliados às transformações graduais do clima, e aos desafios do planejamento territorial, ameaçam a funcionalidade de nossas infraestruturas, causam danos estruturais e impactam diretamente a qualidade de vida de milhões de brasileiros. Nesse contexto, a promoção de estratégias que assegurem sustentabilidade, resiliência e adaptabilidade climática no setor de transportes não é apenas uma prioridade, mas uma condição indispensável para um futuro seguro e próspero.

É com grande entusiasmo que apresentamos a obra *Infraestruturas no Território: Planejamento, Resiliência e Adaptabilidade Climática*, publicada em colaboração com o Instituto de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo (IAU/USP). Este livro propõe uma análise profunda e integrada das interações entre mudanças climáticas, infraestrutura de transportes e ordenamento territorial. Por meio de abordagens multidisciplinares e multiescalares, a obra destaca os desafios prementes que enfrentamos e identifica oportunidades inovadoras para mitigação e adaptação, oferecendo um panorama abrangente e atualizado.

Esta publicação é resultado de uma parceria estratégica entre o Ministério dos Transportes, instituições acadêmicas de excelência e pesquisadores comprometidos com a geração de conhecimento aplicado. Nosso objetivo é munir gestores públicos, profissionais do setor e acadêmicos com ferramentas conceituais e práticas que promovam o desenvolvimento de políticas e projetos de transporte atentos aos impactos climáticos, priorizando a sustentabilidade e a capacidade de adaptação às novas realidades ambientais.

Reafirmo o compromisso do Ministério dos Transportes em fortalecer colaborações que impulsionem a pesquisa, a inovação tecnológica e a disseminação de conhecimento. Juntos, buscamos construir um sistema de transporte mais resiliente, eficiente e ambientalmente responsável, capaz de responder aos desafios do presente e antecipar as demandas do futuro. Que esta obra sirva como um recurso valioso e um testemunho do esforço coletivo para consolidar um Brasil mais sustentável e preparado para os desafios climáticos.

GEORGE ANDRÉ PALERMO SANTORO
*Ministro de Estado dos Transportes*

# A MESSAGE FROM THE MINISTER

The land transportation sector is, without a doubt, a fundamental pillar of Brazil's economic progress and social cohesion. By connecting people, goods, and regions, it drives development and strengthens national integration. However, this sector faces significant challenges in the face of global climate change. Extreme weather events, such as heavy rains, prolonged droughts, and rising sea levels — combined with gradual climate changes and the challenges of land-use planning — threaten the functionality of our infrastructure, cause structural damage, and directly impact the quality of life for millions of Brazilians. In this context, promoting strategies that ensure sustainability, resilience, and climate adaptability in the transportation sector is not only a priority but also an essential prerequisite for a safe and prosperous future.

It is with great enthusiasm that we present the book *Infrastructure in the Territory: Planning, Resilience and Climate Adaptability*, published in collaboration with the Institute of Architecture and Urbanism at the University of São Paulo (IAU/USP). This book offers an in-depth and comprehensive analysis of the interactions between climate change, transportation infrastructure, and land-use planning. Through multidisciplinary and multiscale approaches, this work highlights the pressing challenges we face and identifies innovative opportunities for mitigation and adaptation, offering a comprehensive and up-to-date overview.

This publication is the result of a strategic partnership between the Ministry of Transport, leading academic institutions, and researchers committed to generating applied knowledge. Our goal is to provide public officials, industry professionals, and academics with conceptual and practical tools that promote the development of transportation policies and projects that take climate impacts into account, prioritizing sustainability and the ability to adapt to new environmental realities.

I reaffirm the Ministry of Transport's commitment to strengthening partnerships that promote research, technological innovation, and the dissemination of knowledge. Together, we seek to build a more resilient, efficient, and environmentally responsible transportation system — one capable of addressing today's challenges and anticipating the demands of the future. May this work serve as a valuable resource and a testament to the collective effort to build a more sustainable Brazil that is better prepared for climate challenges.

GEORGE ANDRÉ PALERMO SANTORO
*Minister of State for Transport*

# PALAVRAS DO SECRETÁRIO EXECUTIVO

Com um profundo senso de responsabilidade, apresentamos a obra Infraestruturas no Território: Planejamento, Resiliência e Adaptabilidade Climática, fruto da colaboração estratégica entre o Ministério dos Transportes e o Instituto de Arquitetura e Urbanismo (IAU) da Universidade de São Paulo (USP). Este trabalho surge em um momento crítico, no qual a integração da perspectiva climática ao planejamento e à gestão das infraestruturas de transporte é essencial para enfrentar os desafios impostos pelas mudanças climáticas.

Esta publicação vai além de uma análise teórica, oferecendo um diagnóstico rigoroso e propositivo para fortalecer a resiliência das infraestruturas brasileiras frente a eventos climáticos extremos. Dirigida a gestores públicos, profissionais, pesquisadores e estudantes, a obra reúne conceitos fundamentais, abordagens interdisciplinares e diretrizes práticas, fornecendo ferramentas para avaliar riscos e implementar soluções que promovam a sustentabilidade e a adaptabilidade do setor de transportes.

As estratégias de mitigação e adaptação aqui exploradas transcendem a necessidade ambiental, configurando-se como uma oportunidade estratégica para impulsionar o desenvolvimento econômico sustentável. A promoção de tecnologias limpas, a geração de empregos verdes e o fortalecimento da segurança em redes viárias e ferroviárias são alguns dos benefícios que podem ser alcançados por meio de políticas bem fundamentadas. Este livro busca capacitar seus leitores com conhecimentos atualizados e perspectivas diversificadas, incentivando a formulação de projetos que harmonizem eficiência operacional e responsabilidade ambiental.

Em suma, Infraestruturas no Território: Planejamento, Resiliência e Adaptabilidade Climática se posiciona como uma contribuição indispensável para o avanço do planejamento sustentável no Brasil, ressaltando que a adaptação às mudanças climáticas não é apenas um desafio, mas uma oportunidade para construir um

futuro mais seguro, inclusivo e próspero. Que este trabalho inspire e mobilize esforços integrados entre instituições, setores e comunidades, promovendo uma gestão das infraestruturas que esteja à altura das demandas ambientais e sociais do nosso tempo.

BRUNO PRAXEDES
*Secretário Executivo do Ministério dos Transportes*

# A MESSAGE FROM THE EXECUTIVE SECRETARY

With a deep sense of responsibility, we present the publication Infrastructure in the Territory: Planning, Resilience and Climate Adaptability, the result of a strategic collaboration between the Ministry of Transport and the Institute of Architecture and Urbanism (IAU) at the University of São Paulo (USP). This study comes at a critical juncture, when integrating a climate perspective into the planning and management of transportation infrastructure is essential to addressing the challenges posed by climate change.

This publication goes beyond a theoretical analysis, offering a rigorous and forward-looking assessment aimed at strengthening the resilience of Brazilian infrastructure in the face of extreme "climate" events. Aimed at public officials, professionals, researchers, and students, this book brings together fundamental concepts, interdisciplinary approaches, and practical guidelines, providing tools to assess risks and implement solutions that promote sustainability and adaptability in the transportation sector.

The mitigation and adaptation strategies explored here go beyond environmental necessity and represent a strategic opportunity to drive sustainable economic development. The promotion of clean technologies, the creation of green jobs, and the improvement of safety on road and rail networks are some of the benefits that can be achieved through well-founded policies. This book aims to equip its readers with up-to-date knowledge and diverse perspectives, encouraging the development of projects that balance operational efficiency and environmental responsibility.

In short, Infrastructure in the Territory: Planning, Resilience and Climate Adaptability stands as an indispensable contribution to the advancement of sustainable planning in Brazil, emphasizing that adaptation to climate change is not merely a challenge but an opportunity to build a safer, more inclusive, and more prosperous future. May this work inspire and mobilize coordinated efforts among insti-

tutions, sectors, and communities, promoting infrastructure management that meets the environmental and social demands of our time.

BRUNO PRAXEDES
*Executive Secretary of the Ministry of Transport*

# PALAVRAS DO SUBSECRETÁRIO DE SUSTENTABILIDADE

Esta publicação materializa o compromisso contínuo do Ministério dos Transportes em fomentar parcerias com instituições acadêmicas e de pesquisa, visando impulsionar estudos e a difusão de conhecimento para a sustentabilidade do sistema de infraestrutura de transportes.

A obra surge em um momento crucial, onde a intensificação das mudanças climáticas em âmbito global, manifestada por eventos como tempestades, inundações, secas e elevação do nível do mar, impõe desafios sem precedentes à segurança e à resiliência de nossos sistemas de transporte. Reconhecendo essa urgência, este livro dedica-se a examinar de maneira ampla as complexas relações entre as mudanças climáticas, a infraestrutura de transportes e o território, destacando tanto os desafios quanto as oportunidades para inovação e adaptação.

Com o objetivo central de oferecer notas introdutórias relevantes sobre infraestruturas e mudança do clima, a obra proporciona uma compreensão aprofundada dos desafios da urgência climática e suas conexões com o setor. Ao longo de suas páginas, governantes, profissionais, pesquisadores e estudantes encontrarão uma compilação essencial de conceitos fundamentais, abordagens multidisciplinares e práticas recomendadas relacionadas às Infraestruturas de Transportes e Mudanças Climáticas. Mais do que uma simples sumarização, o livro visa injetar conhecimento atual e diretrizes setoriais específicas no debate, apresentando um diagnóstico embasado e propositivo para fortalecer a resiliência das infraestruturas brasileiras.

Para tanto, o conteúdo abrange uma vasta gama de temas interconectados. Primeiramente, o livro explora os riscos climáticos nas infraestruturas, com análises aprofundadas dos impactos de fenômenos extremos nos diferentes modais de transporte

– incluindo o rodoviário, ferroviário e aquaviário. É detalhada a vulnerabilidade de regiões e cidades a desastres geo-hidrológicos e secas, ressaltando a necessidade de abordagens específicas. Em seguida, a obra aprofunda os conceitos de resiliência e adaptabilidade, explorando a resiliência sistêmica como a capacidade das redes de infraestrutura de absorver, adaptar-se e recuperar-se de perturbações, transcendendo a proteção de ativos isolados e evitando a "mal-adaptação".

O volume também apresenta as políticas públicas e estratégias de adaptação, destacando o Plano Clima como o principal norteador das políticas nacionais de adaptação, e detalhando programas como o PRO-AdaptaVias, que promove a resiliência da infraestrutura federal de transportes terrestres. São discutidos mecanismos inovadores, como a aplicação de Soluções Baseadas na Natureza (SbN) para aumentar a resiliência, exemplificando com a restauração de manguezais e pavimentos permeáveis, além de mecanismos de financiamento climático, como debêntures incentivadas e metodologias de avaliação econômica como a Análise de Opções Reais (AOR) e a Análise Multicritério (AMC). Por fim, são sublinhadas as oportunidades de desenvolvimento sustentável, reforçando que as ações de mitigação e adaptação são uma oportunidade estratégica para promover o desenvolvimento econômico sustentável, com a geração de empregos verdes, o avanço de tecnologias limpas e a melhoria da segurança.

Este trabalho conjunto é um dos diversos meios de difusão do conhecimento gerado por essa parceria, abrangendo discussões produtivas que envolvem reflexões em níveis estratégicos, táticos e operacionais. Almejamos que esta publicação sirva como referência valiosa, fortalecendo as competências para o planejamento integrado e aumentando a assertividade na formulação de políticas públicas. Que esta obra inspire a todos a avançar nessa trajetória, rumo a um setor de transportes cada vez mais sustentável, resiliente e ambientalmente responsável, capaz de suportar os impactos do clima e prosperar em um futuro desafiador.

CLOVES EDUARDO BENEVIDES
*Subsecretário de Sustentabilidade do Ministério dos Transportes*

# A MESSAGE FROM THE UNDER-SECRETARY FOR SUSTAINABILITY

This publication reflects the Ministry of Transport's ongoing commitment to fostering partnerships with academic and research institutions, aiming to promote studies and the dissemination of knowledge to ensure the sustainability of the transportation infrastructure system.

This work comes at a crucial moment, when the intensification of global climate change — manifested in events such as storms, floods, droughts, and rising sea levels — poses unprecedented challenges to the safety and resilience of our transportation systems. Recognizing this urgency, this book is dedicated to a comprehensive examination of the complex relationships between climate change, transportation infrastructure, and the built environment, highlighting both the challenges and the opportunities for innovation and adaptation.

With the primary goal of providing relevant introductory insights into infrastructure and climate change, this book offers an in-depth understanding of the challenges posed by the climate emergency and its connections to the sector. Throughout its pages, government officials, professionals, researchers, and students will find an essential compilation of key concepts, multidisciplinary approaches, and best practices related to Transportation Infrastructure and Climate Change. Rather than simply providing a summary, the book aims to bring current knowledge and sector-specific guidelines into the debate, presenting a well-founded and proactive analysis to strengthen the resilience of Brazil's infrastructure.

To that end, the content covers a wide range of interconnected topics. First, the book explores climate-related risks to infrastructure, with in-depth analyses of the impacts of extreme events on different modes of transportation — including road, rail, and

waterway transportation. The vulnerability of regions and cities to geohydrological disasters and droughts is described in detail, highlighting the need for specific approaches. The book then delves deeper into the concepts of resilience and adaptability, exploring systemic resilience as the ability of infrastructure networks to absorb, adapt to, and recover from disruptions, going beyond the protection of isolated assets and avoiding "maladaptation."

The report also presents public policies and adaptation strategies, highlighting the Climate Plan (Plano Clima) as the main guiding framework for national adaptation policies, and detailing programs such as PRO-AdaptaVias, which promotes the resilience of federal land transportation infrastructure. The report discusses innovative mechanisms, such as the application of Nature-Based Solutions (NBS) to increase resilience, citing examples such as mangrove restoration and permeable pavements, as well as climate finance mechanisms, such as incentive debentures, and economic evaluation methodologies such as Real Options Analysis (ROA) and Multi-Criteria Analysis (MCA). Finally, the report highlights opportunities for sustainable development, emphasizing that mitigation and adaptation measures represent a strategic opportunity to promote sustainable economic development through the creation of green jobs, the advancement of clean technologies, and improved safety.

This collaborative effort is one of several ways to disseminate the knowledge generated by this partnership, encompassing productive discussions that involve reflections at the strategic, tactical, and operational levels. We hope this publication will serve as a valuable reference, strengthening capabilities for integrated planning and improving the effectiveness of public policy formulation. May this work inspire everyone to continue on this path toward an increasingly sustainable, resilient, and environmentally responsible transportation sector — one capable of withstanding the impacts of climate change and thriving in a challenging future.

CLOVES EDUARDO BENEVIDES
*Undersecretary for Sustainability at the Ministry of Transport*

# APRESENTAÇÃO

O livro **Infraestruturas no Território: Planejamento, Resiliência e Adaptabilidade Climática** tem como principal finalidade contribuir para o entendimento sobre a resiliência e adaptabilidade das infraestruturas de transporte no Brasil, especialmente pelas práticas de planejamento, considerando os fenômenos climáticos contemporâneos. É resultado de Acordo de Cooperação Técnica (ACT) entre o Ministério dos Transportes (sob coordenação da Subsecretaria de Sustentabilidade) e o Instituto de Arquitetura e Urbanismo da USP (IAU-USP). Foi concebido a partir dos debates proporcionados nas disciplinas do programa de pós-graduação do IAU-USP, entre os anos de 2022 e 2025, e tem o objetivo de agregar o conhecimento teórico e empírico à reflexão sobre riscos, conflitos, mudanças climáticas e as transições sociotécnicas das infraestruturas.

A questão central deste livro foi compreender como o campo do planejamento (urbano, regional, climático, administrativo, fiscal, de gestão) será capaz de propor inovações e alçar a infraestrutura de um ponto de vista predominantemente técnico para uma perspectiva social. Há, em curso, um conjunto de medidas e esforços para mitigar impactos climáticos sobre as infraestruturas. Como há, também, em âmbito nacional e internacional, novas diretrizes e novos conceitos que buscam responder com maior aderência aos riscos e às vulnerabilidades dos ativos infraestruturais. As ideias contidas neste livro somam-se a essas iniciativas buscando um desenho crítico e propositivo condizente com as especificidades territoriais brasileiras.

O livro tem a finalidade de sistematizar parâmetros introdutórios de agendas, exemplos e conceitos relacionados às mudanças climáticas. Ele está dividido em cinco partes, além da **Introdução**, que aprofunda conceitos e apresenta questões que permeiam os capítulos. Na **Parte I – Conceitos Aplicados para a Transição: Infraestrutura e os Aspectos Climáticos**, o Capítulo 1 apresenta a agenda do planejamento relativa às mudanças climáticas relacionada ao Plano Clima federal, bem como suas ações com foco nos

setores de energia, cidades, transportes e recursos hídricos e pelas abordagens institucional, de governança e do planejamento para a adaptabilidade. O Capítulo 2 aborda a adaptabilidade pelos investimentos e trata dos conceitos de risco e de resiliência pela perspectiva da aplicabilidade de estratégias.

Na **Parte II - Riscos Climáticos nas Infraestruturas**, o Capítulo 3 apresenta casos aplicados de combate indireto e de mitigação às mudanças climáticas, especificamente sobre rodovias, pelos instrumentos de controle de gases de efeito estufa (GEE), índice de desenvolvimento de sustentabilidade (IDS) e parâmetros de desempenho de sustentabilidade (PDS). O Capítulo 4 parte de um estudo de caso sobre a relação entre infraestrutura e área de risco, que afeta população de baixa renda por remoção e reassentamento, apresentando as discussões que permeiam as soluções efetivas de mitigação aos efeitos das mudanças climáticas. O Capítulo 5 problematiza o evento seca-calor nas rodovias e hidrovias, com uma análise sobre as hidrovias Solimões-Amazonas e Tietê-Paraná, demonstrando o impacto nas infraestruturas críticas e efeitos cascata em comunidades ribeirinhas. O Capítulo 6 apresenta os problemas de infraestrutura urbana acentuados pelos eventos de alta precipitação relacionados às mudanças climáticas, com foco na região costeira de Natal-RN e na drenagem dos bairros desse município, que afetam outras infraestruturas e setores interdependentes.

Na **Parte III - Impactos Sistêmicos entre Infraestrutura e as Cidades**, o Capítulo 7 analisa a relação entre a infraestrutura ferroviária e as cidades por dois troncos e seis municípios do interior paulista demonstrando como ocorreu a transição sociotécnica ferrovia-rodovia e, atualmente, como o setor de logística está promovendo a transição dos serviços pelo modelo "*shortline*" com uma cadeia de impactos comuns a todas as cidades analisadas. O Capítulo 8 analisa o caso do aeroporto Leite Lopes, de Ribeirão Preto-SP, pelos conflitos urbanos e ambientais, destacando o papel crucial das relações fundiárias no entorno de grandes infraestruturas de transporte e os agravamentos desses problemas pelos implicantes climáticos. O Capítulo 9 analisa o trecho mineiro da rodovia BR-262 apresentando os impactos socioeconômicos na sua área de influência regional e urbana decorrentes de sua duplicação.

Na **Parte IV - Perspectivas de Resiliência e Adaptabilidade para Infraestrutura**, o Capítulo 10 apresenta quadro detalhado dos eventos extremos e seus impactos nas infraestruturas de transportes, trata de vulnerabilidades sistêmicas e efeitos cascata, da adaptabilidade, governança e planejamento com fins à justiça climática. O Capítulo 11 apresenta um caso de integração entre políticas climáticas e de transporte ferroviário pelos aspectos econômicos e a partir da perspectiva gerencial desse modal. O Capítulo 12 aborda a resiliência e a adaptabilidade das infraestruturas de transporte, com casos internacionais de soluções baseadas na natureza (SbN) demonstrando a necessidade de envolvimento das áreas de planejamento urbano, engenharia civil, gestão ambiental e defesa civil por critérios ecológicos, instrumentos de planejamento e contratações públicas.

Na **Parte V – Notas Finais**, o Capítulo 13 apresenta a perspectiva da *Coalition for Disaster Resilient Infrastructure* (CDRI) sobre os desafios da resiliência climática das infraestruturas. A CDRI é uma coalizão global que compõe a UNDRR (*United Nation Office for Disaster Risk Reduction*) e está voltada ao fortalecimento da resiliência da infraestrutura contra os riscos climáticos e de desastres. Com 53 países membros e 12 organizações parceiras, inclui governos nacionais, organismos internacionais e empresas que colaboram para trocar conhecimento, impulsionar pesquisas e investir em infraestrutura resiliente a desastres. Representa parceria na internacionalização do debate e dos diálogos multilaterais para uma revisão crítica da infraestrutura nacional.

Os capítulos apresentam um panorama das práticas e das críticas presentes na gestão pública, na academia, no mercado e em organização multilateral, sendo uma oportunidade de democratizar informações e ampliar debates. Nesse sentido, as autoras e os autores deste livro investigam a realidade nacional das infraestruturas de transportes e suas interdependências com outros setores, pelo enfoque territorial, buscando apresentar a diversidade regional, os desafios sociais e os potenciais de gestão que podem ser apropriados pela disciplina do planejamento. Emergem conceitos, críticas, práticas e exemplos que investem na problematização da pauta climática como agravante de problemas e conflitos já existentes, bem como de novos desafios a serem enfrentados.

Este projeto foi motivado pela necessidade de compreender os impactos climáticos em infraestruturas. Avançou nesse tema ao elencar questões complexas, que vão requerer espaços específicos de aprofundamento, e por isso foram aqui apresentadas de forma introdutória para pautar a agenda de debates. Buscando saber como enfrentar os desafios contemporâneos das infraestruturas no Brasil, o livro reúne visões de múltiplas escalas a partir de um ponto comum: o território.

GEORGE YUN
*Coordenador-Geral de Projetos Especiais e Mudança do Clima na Subsecretaria de Sustentabilidade (SUST-Ministério dos Transportes)*

JEFERSON TAVARES
*Professor no Instituto de Arquitetura e Urbanismo da USP*

# PRESENTATION

The book **Infrastructure in the Territory: Planning, Resilience and Climate Adaptability** aims to contribute to the understanding of the resilience and adaptability of transportation infrastructure in Brazil, especially through planning practices, considering contemporary climate phenomena. It is the result of a Technical Cooperation Agreement (Acordo de Cooperação Técnica – ACT) between the Ministry of Transport (under the coordination of the Undersecretary of Sustainability) and the Institute of Architecture and Urbanism at USP (IAU-USP). It was conceived from debates held in the IAU-USP graduate program between 2022 and 2025, and aims to combine theoretical and empirical knowledge with reflection on risks, conflicts, climate change, and the socio-technical transitions of infrastructure.

The central theme of this book was to understand how the field of planning (urban, regional, climate, administrative, fiscal, management) will be able to propose innovations and raise infrastructure from a predominantly technical point of view to a social perspective. A series of measures and efforts are underway to mitigate climate impacts on infrastructure. There are also new guidelines and concepts at the national and international levels that seek to respond more effectively to the risks and vulnerabilities of infrastructure assets. The ideas contained in this book add to these initiatives, seeking a critical and proactive design consistent with the specific characteristics of Brazil.

The book aims to systematize introductory parameters of agendas, examples, and concepts related to climate change. It is divided into five parts, in addition to the **Introduction**, which explores concepts in greater depth and presents issues that permeate the chapters. In **Part I – Concepts Applied to the Transition: Infrastructure and Climate Aspects**, Chapter 1 presents the climate change planning agenda related to the federal Plano Clima, as well as its actions focused on the energy, cities, transportation, and water resources sectors, and institutional, governance, and plan-

ning approaches for adaptability. Chapter 2 addresses adaptability through investments and deals with the concepts of risk and resilience from the perspective of strategy applicability.

In **Part II - Climate Risks in Infrastructure**, Chapter 3 presents applied cases of indirect combating and mitigation of climate change, specifically on highways, through greenhouse gas (GHG) control instruments, the sustainability development index (SDI), and sustainability performance parameters (SPP). Chapter 4 begins with a case study on the relationship between infrastructure and risk areas, which affects low-income populations through removal and resettlement, presenting discussions that permeate effective solutions for mitigating the effects of climate change. Chapter 5 addresses the issue of drought and heat on highways and waterways, with an analysis of the Solimões-Amazonas and Tietê-Paraná waterways, demonstrating the impact on critical infrastructure and cascading effects on riverside communities. Chapter 6 presents urban infrastructure problems exacerbated by high precipitation events related to climate change, focusing on the coastal region of Natal-RN and the drainage of neighborhoods in that municipality, which affects other interdependent infrastructures and sectors.

In **Part III - Systemic Impacts between Infrastructure and Cities**, Chapter 7 analyzes the relationship between railway infrastructure and cities through two railway lines and six municipalities in the interior of São Paulo, demonstrating how the socio-technical transition from rail to road occurred and, currently, how the logistics sector is promoting the transition of services through the shortline model, with a chain of impacts common to all the cities analyzed. Chapter 8 analyzes the case of Leite Lopes Airport in Ribeirão Preto, São Paulo, in terms of urban and environmental conflicts, highlighting the crucial role of land relations in the vicinity of large transportation infrastructures and the aggravation of these problems by climate implications. Chapter 9 analyzes the Minas Gerais section of the BR-262 highway, presenting the socioeconomic impacts on its regional and urban area of influence resulting from its duplication.

In **Part IV - Perspectives on Resilience and Adaptability for Infrastructure**, Chapter 10 presents a detailed overview of extreme

events and their impacts on transport infrastructure, addressing systemic vulnerabilities and cascading effects, adaptability, governance, and planning for climate justice. Chapter 11 presents a case study of integration between climate and rail transport policies from an economic perspective and from the managerial perspective of this mode of transport. Chapter 12 addresses the resilience and adaptability of transport infrastructure, with international cases of nature-based solutions (NbS) demonstrating the need for involvement in the areas of urban planning, civil engineering, environmental management, and civil defense through ecological criteria, planning instruments, and public procurement.

In **Part V – Final Notes**, Chapter 13 presents the Coalition for Disaster Resilient Infrastructure (CDRI) perspective on the challenges of climate resilience of infrastructure. CDRI is a global coalition that forms part of UNDRR (United Nations Office for Disaster Risk Reduction) and is focused on strengthening infrastructure resilience against climate and disaster risks. With 53 member countries and 12 partner organizations, it includes national governments, international agencies, and companies that collaborate to exchange knowledge, promote research, and invest in disaster-resilient infrastructure. It represents a partnership in the internationalization of the debate and multilateral dialogues for a critical review of national infrastructure.

The chapters provide an overview of practices and critiques in public management, academia, the market, and multilateral organizations, offering an opportunity to democratize information and broaden debates. In this sense, the authors of this book investigate the national reality of transport infrastructure and its interdependencies with other sectors, using a territorial approach, seeking to present regional diversity, social challenges, and management potentials that can be appropriated by the discipline of planning. Concepts, critiques, practices, and examples emerge that focus on the climate agenda as an aggravating factor in existing problems and conflicts, as well as new challenges to be faced.

This project was motivated by the need to understand climate impacts on infrastructure. It advanced this topic by listing complex issues that will require specific spaces for further discus-

sion, and for this reason they were presented here in an introductory manner to set the agenda for debate. Seeking to understand how to address contemporary infrastructure challenges in Brazil, the book brings together perspectives on multiple scales from a common starting point: territory.

GEORGE YUN
*General Coordinator of Special Projects and Climate Change at the Undersecretariat for Sustainability (SUST-Ministry of Transport)*

JEFERSON TAVARES
*Professor at the Institute of Architecture and Urbanism at USP*

# SUMÁRIO
# *SUMMARY*

**Palavras do Ministro** ..... **4**
A Message from the Minister ..... 6

**Palavras do Secretário Executivo** ..... **8**
A Message from the Executive Secretary ..... 10

**Palavras do Subsecretário de Sustentabilidade** ..... **12**
A Message from the Under-Secretary For Sustainability ..... 14

**Apresentação** ..... **16**
Presentation ..... 20

**INTRODUÇÃO** ..... **29**
***INTRODUCTION*** ..... ***51***
*Jeferson Tavares*

PARTE I
**CONCEITOS APLICADOS PARA A TRANSIÇÃO: INFRAESTRUTURA E OS ASPECTOS CLIMÁTICOS**
***PART I***
***CONCEPTS APPLIED TO THE TRANSITION: INFRASTRUCTURE AND CLIMATE ASPECTS***

**Resiliência Climática nas Infraestruturas Brasileiras e a Agenda de Adaptação do Plano Clima** ..... **74**
Climate Resilience in Brazilian Infrastructures and the Adaptation Agenda of the Climate Plan ..... 99
*Érico Rocha, Inamara Mélo e Thiago Olante Casagrande*

**Investimentos em Infraestrutura e Resiliência Climática: Conceitos, Desafios e Caminhos ..... 124**
Investments in Infrastructure and Climate Resilience: Concepts, Challenges and Paths ..... 151
*Rodolfo Gomes Benevenuto*

PARTE II
**RISCOS CLIMÁTICOS NAS INFRAESTRUTURAS**
***PART II***
***CLIMATE RISKS IN INFRASTRUCTURE***

**Políticas Públicas e Ações Regulatórias para Redução dos Riscos Climáticos nos Ativos Rodoviários do Brasil ..... 178**
Public Policies and Regulatory Actions to Reduce Climate Risks in Brazil's Road Assets ..... 200
*Fernando Barbelli Feitosa, Felipe Fernandes Queiroz e Ricardo Luiz Medeiros Meirelles*

**Reassentamento em Áreas de Risco e Mudanças Climáticas: O Caso da Vila Bom Destino (BR-381/MG) ..... 222**
Resettlement in Areas of Risk and Climate Change: The Case of Vila Bom Destino (BR-381/MG) ..... 239
*Leandro Eustáquio Tito Muniz*

**As Secas no Brasil e Impactos em Infraestrutura ..... 256**
Droughts in Brazil and Impacts on Infrastructure ..... 275
*Ana Paula M. A. Cunha, Lidiane Cristina Oliveira Costa, Márcia Regina Guimarães Guedes, Nelson P. A. Mateus e Suellen Roballo Fischer*

**Infraestrutura Urbana e a Dupla Ameaça Hídrica: Vulnerabilidade à Erosão Costeira e Alagamentos Pluviais em Natal (RN) ..... 294**
Urban Infrastructure and the Double Water Threat: Vulnerability to Coastal Erosion and Rainwater Flooding in Natal (RN) ..... 322
*Venerando Eustáquio Amaro, Sarah de Andrade e Andrade e Gabriel Dalla Rosa Carvalho*

PARTE III
**IMPACTOS SISTÊMICOS ENTRE INFRAESTRUTURA E AS CIDADES**

***PART III***
***SYSTEMIC IMPACTS BETWEEN INFRASTRUCTURE AND CITIES***

**Infraestrutura Ferroviária e as Dinâmicas Urbanas e Regionais: Impactos, Conflitos e Transformações Territoriais ..... 352**

Railway Infrastructure and Urban and Regional Dynamics: Impacts, Conflicts and Territorial Transformations ..... 382

*Beatriz Kopperschmidt de Oliveira*

**Entre a Infraestrutura e a Cidade: Aeroporto Leite Lopes em Ribeirão Preto – Questões Fundiárias, Impactos Socioambientais e Conflitos Sociais ..... 412**

Between Infrastructure and the City: Leite Lopes Airport in Ribeirão Preto – Land Issues, Socio-Environmental Impacts and Social Conflicts ..... 431

*Thiago Pizzo Scatena*

**A Relação Rodovia X Cidade: Conflitos e Impactos nas Áreas Urbanizadas. O Caso da Rodovia BR-262 em Minas Gerais ..... 450**

The Relationship Between Roadway and City: Conflicts and Impacts in Urbanized Areas. The Case of the BR-262 Roadway in Minas Gerais ..... 477

*Marília Gaspar de Souza Lima*

PARTE IV
**PERSPECTIVAS DE RESILIÊNCIA E ADAPTABILIDADE PARA INFRAESTRUTURAS**

***PART IV***
***PERSPECTIVES OF RESILIENCE AND ADAPTABILITY FOR INFRASTRUCTURE***

**Desenvolvendo Capacidades Adaptativas ao Setor de Transportes em um Futuro Climático Incerto ..... 506**

Building Adaptive Capacities for the Transport Sector in an Uncertain Climate Future ..... 535

*George Yun, Andréa Souza Santos e Jeancarlo Alberto Dos Reis*

**Eficiência Logística com Sustentabilidade: A Importância da Expansão Ferroviária no Brasil ..... 564**
Logistical Efficiency and Sustainability: The Importance of Railway Expansion in Brazil ..... 588
*Jefferson Vasconcelos Santos e Bruno Marques dos Santos Silva*

**Avaliação de Infraestrutura de Transporte Resiliente: A Integração de Soluções Baseadas na Natureza para Enfrentar Desastres Climáticos e Promover Sustentabilidade ..... 612**
Assessment Of Resilient Transport Infrastructure: Integrating Nature-Based Solutions to Address Climate-Related Disasters and Promote Sustainability ..... 630
*Luiza Carvalho Tereza*

PARTE V -
**NOTAS FINAIS**
***PART V***
***FINAL NOTES***

**Infraestrutura resiliente a alterações e desastres climáticos em economias emergentes e em desenvolvimento: riscos, desafios e oportunidades ..... 650**
Climate and disaster resilient infrastructure in emerging and developing economies: risks, challenges and opportunities ..... 680
*Abhijit Datey, Raina Singh, e Aishwarya Raj*

CRÉDITOS
***CREDITS***

**Colaboradores e Autores ..... 708**
Contributors and Authors ..... 722

**Índice Remissivo ..... 736**
Index ..... 740

# INTRODUÇÃO
# *INTRODUCTION*

# INFRAESTRUTURA EM FOCO: PLANEJAMENTO FRENTE ÀS MUDANÇAS CLIMÁTICAS

JEFERSON TAVARES

Os impactos de eventos climáticos sobre infraestruturas nacionais têm alertado gestores, mercado, sociedade, academia e organismos sociais e multilaterais sobre seus danos. Esses impactos apresentam desafios pouco ou quase nada mensurados no histórico de provisão infraestrutural, dado o ineditismo de suas dimensões sistêmicas, as largas abrangências geográficas e as intensidades extremas. Além disso, quando observados com mais cuidado, confirmam ou reforçam problemas, vulnerabilidades e riscos pré-existentes e historicamente negligenciados.

Concomitantemente, o atual quadro de transformações no campo tecnológico, da governança e da manutenção de infraestruturas tem trazido questionamentos sobre os paradigmas conceituais e empíricos que estão na base de suas concepções. As maiores evidências são relativas aos danos que as infraestruturas sofrem com as mudanças climáticas e, reciprocamente, aos danos que as infraestruturas causam no ambiente natural e construído quando se rompem ou colapsam. Riscos de rupturas e colapsos afetam cotidianamente os usuários e as regiões dependentes dos serviços de infraestrutura, cujos efeitos se reproduzem em cascata, dada a natureza sistêmica de suas funcionalidades e operacionalidades. Condições que requerem analisá-las sob diferentes prismas escalares, envolvendo aspectos tecnológicos, econômicos ou institucionais, mas sem desvinculá-las do território.

O que se apresenta como notas introdutórias à discussão proposta neste livro são alguns conceitos que permeiam direta ou

indiretamente os capítulos e que serão aqui problematizados à luz do planejamento, com vistas à construção de referenciais comuns para as práticas de resiliência de infraestruturas. E, complementarmente, são também uma reflexão sobre as infraestruturas e as mudanças climáticas, tendo em vista as demandas urgentes, mas também as transições desejadas em médio e longo prazos. Com o objetivo de focar a relação entre as questões tecnológicas e sociais, as reflexões propostas seguem o argumento central de que a técnica não é neutra e, quando aplicada por decisões políticas e embasadas cientificamente, carregam a responsabilidade de transformação do território.

Nesse sentido, para subsidiar as discussões, partimos de algumas características técnicas das infraestruturas que repercutem de forma sistêmica na sociedade e que podem contribuir para uma revisão sobre como são adotadas para a prática do planejamento de infraestruturas, sobretudo sob as condições decorrentes dos eventos climáticos. Assim, propomos uma breve análise das infraestruturas por binômios técnico-sociais, a fim de articular uma visão crítica sobre as propriedades das infraestruturas que são derivadas de decisões organizacionais e que, portanto, levam em conta condicionantes políticas, econômicas, sociais, culturais, etc.

Serão analisadas: as interdependências entre infraestruturas que proporcionam complexidades sistêmicas na provisão de serviços e cujos riscos apontam para a necessidade do entendimento da criticidade das infraestruturas (binômio interdependências e infraestrutura crítica); os efeitos cascata que ampliam os impactos de colapsos e rupturas sobre os serviços prestados e sobre seus custos operacionais e de manutenção e requerem estratégias de resiliência (binômio efeitos cascata e resiliência sistêmica); e a fragmentação institucional que tem evoluído de uma já exacerbada setorialidade para uma multiplicidade de agentes com distintas funções e interesses diversos, demonstrando a necessidade de repensar a governança das infraestruturas (binômio fragmentação institucional e governança territorial). Vamos apresentá-los pelo enfoque do planejamento, com o objetivo de subsidiar uma agenda de revisões conceituais do uso das infraestruturas.

## INTERDEPENDÊNCIAS E INFRAESTRUTURA CRÍTICA

As interdependências são interações que ocorrem entre componentes e setores de infraestruturas, e são vitais para a manutenção de suas operações. O aumento da conectividade entre infraestruturas e a dependência intersetorial entre elas constrói sistemas de sistemas, nos quais a falha de um componente impede ou danifica o funcionamento de outro componente. A partir da identificação das interdependências, é possível classificar as infraestruturas críticas, ou seja, aquelas de maior relevância para o funcionamento de diferentes sistemas integrados, cuja manutenção é prioritária para a segurança e o bem-estar das pessoas.

As interdependências podem ocorrer por diferentes conexões nos âmbitos físico, da automação ou cibernética, geográfico e da decisão ou conexão lógica (Rinaldi, Peerenboom e Kelly, 2001). Elas têm grande potencial de transmitir falhas de um setor para outro, principalmente em cadeias complexas, ampliando a propagação de danos. As dimensões de interdependência estão vinculadas à operação, às características da infraestrutura, ao tipo de falha, ao acoplamento vigente, à resposta dada ao problema e ao ambiente. A tendência de maior interação digital entre as infraestruturas e a desregulamentação de seus usos reforçam a propagação de riscos, afetando um número cada vez maior de pessoas.

Especificamente para os transportes, a importância de classificar as ameaças potenciais decorrentes das dependências entre o estado da infraestrutura e suas vulnerabilidades leva em consideração critérios setoriais (intensidade de tráfego, custos de recuperação, impacto econômico) e transversais (impactos sobre a vida humana, economia e meio ambiente) (Dvorák *et al.*, 2017). A maior integração com outros setores (energia, água, comunicação, automação, logística, etc.) agrava o potencial dos riscos e deixa os sistemas ainda mais vulneráveis ao colapso diante de eventos climáticos e/ou eventos extremos.

Esses riscos têm requerido definir — no âmbito internacional, continental, nacional e regional — quais são as infraestruturas cujas vulnerabilidades representam maiores danos aos serviços

estratégicos para o funcionamento da sociedade. Essas infraestruturas foram classificadas como críticas frente à importância que representam para os sistemas, as redes e as cadeias sobre as quais (ou com as quais) elas atuam. As definições de infraestrutura crítica e suas classificações iniciaram-se com o entendimento de que as infraestruturas se tornam mais vulneráveis com o aumento da integração entre seu funcionamento e suportes tecnológicos que são dependentes de sistemas complexos, cuja pane afetaria um conjunto de serviços interdependentes.

Essa percepção passou para os riscos de destruição de instalações estatais ou de serviços essenciais, como sistemas de água, eletricidade, comunicação ou transporte, relacionadas a atentados terroristas, sobretudo após o atentado de 11 de setembro de 2001. Atualmente, são comuns as abordagens das vulnerabilidades das infraestruturas críticas em relação aos impactos relacionados aos fenômenos climáticos, como a destruição em massa de infraestruturas urbanas e regionais ou interrupção de serviços essenciais por eventos extremos.

A rigor, infraestruturas críticas são aquelas infraestruturas que, ao longo do tempo, passam a ser vitais para a sociedade, com diferentes classificações por países e regiões. Ou seja, importa, para o grau de criticidade, a ordem de prioridade de uma dada infraestrutura que requeira proteção e segurança para garantir sua operacionalidade, a operacionalidade daquelas infraestruturas dependentes dela e das que exercem influência sobre elas. O grau de criticidade também importa para determinar ações de rápido retorno dos serviços frente a danos causados por diferentes fontes de risco e vulnerabilidade e está vinculado aos ativos físicos, mas também aos aspectos legais, de gestão e de cibernética, cujo risco afeta a segurança, a economia nacional e a saúde pública.

As infraestruturas que são consideradas críticas, em geral, são infraestruturas que estão vinculadas ao funcionamento básico da sociedade e que garantem suprimentos e serviços essenciais. Dada a importância de seus funcionamentos e aos altos custos de sua implantação, são projetadas e construídas para terem longa duração. Portanto, são infraestruturas que estão em áreas que passam por grandes transformações e foram concebidas sem levar em

conta as radicais transformações contemporâneas (Huddleston; Smith; White, 2022), e, então, estão submetidas a condições imprevisíveis de mudanças do entorno e de incidência de eventos extremos, demonstrando difícil adaptabilidade e requerendo estratégias complexas e onerosas para sua proteção.

Na revisão de escopo de literatura, Huddleston, Smith e White (2022) identificaram que alguns setores de energia, transporte, água e comunicações são mais frequentemente considerados como críticos, embora a habitação, equipamentos para idosos e primeira infância, sistemas jurídicos, indústria da construção, mídia e pesquisa também sejam setores classificados como críticos. A interconectividade tem sido o elemento preponderante para definir seu grau de criticidade, mas não é a única característica, sendo acompanhada pelo fator de investimentos, ativos em diferentes jurisdições, presença de diferentes financiamentos e proprietários, ativos de longa vida útil e o envelhecimento dos componentes. Nesse contexto, os sistemas físicos são prioritários nas definições, por estarem vinculados a um forte viés econômico, embora a multidimensionalidade (sistemas físicos e sociais) esteja na percepção da importância de sua criticidade para o funcionamento da sociedade, sobretudo pelo bem-estar social e cultural.

Os autores identificam, nessa revisão, quatro tipos de infraestrutura crítica: a física ("*hard infrastructure*" ou infraestrutura rígida), relacionada à produção tradicional por sistemas e ativos provedores de serviços com alta dependência de conexões entre setores; a verde (ou baseada na natureza), considerada pelos elementos ambientais (naturais ou construídos) que fornecem serviços ecossistêmicos e é defendida como alternativa à infraestrutura física, sobretudo em relação às mudanças climáticas; a institucional, relacionada aos sistemas humanos que apoiam o funcionamento da infraestrutura física, são os sistemas intangíveis como força de trabalho qualificado, políticas eficazes e relações interinstitucionais, todas agrupadas pela terminologia de sociotécnica; e a cultural, também com sistemas intangíveis, de pessoas e comunidades como conhecimentos locais, senso de comunidade, conexão com um lugar, elementos culturais e elementos e identidades criados organicamente.

Como os próprios autores concluem, não há um consenso sobre a definição de infraestrutura crítica, mas alguns entendimentos gerais convergentes a respeito da garantia do bem-estar, das atividades econômicas e da segurança da sociedade. E, em alguns casos, são definidas a partir do impacto negativo na sua operacionalidade, e não pela sua funcionalidade cotidiana. Suas definições e determinações precisam, ainda, ser vislumbradas não só em âmbito nacional (em consonância com o continental), mas também em âmbito regional (em consonância com o local), pelo reconhecimento das relações escalares de sua influência entre níveis federativos e nos níveis internacionais. Os aspectos culturais da infraestrutura crítica, por exemplo, somente são identificáveis no seu entendimento territorial por métodos multicritérios.

Há também o conceito de redes de infraestrutura crítica urbana (Liu; Song, 2020), que envolve as redes de água, esgoto, gás, transporte, eletricidade e comunicação. Essa conceituação confirma duas constatações: a primeira é sobre a necessidade de diferenciar impactos a partir da qualificação do território, urbanizado ou não urbanizado, pois essa diferenciação conduz à interpretação de determinadas prioridades (como a de esgoto, no âmbito urbano, ou a de economia, num âmbito mais geral); a segunda é sobre o nível de criticidade a ser considerado a depender da abrangência no cotidiano das pessoas (como a importância de transportes para assistências emergenciais em caso de catástrofes, ou gás para atender aquecimento em eventos climáticos extremos).

A *United Nations Office for Disaster Risk Reduction* (UNDRR) definiu, em 2009, a infraestrutura crítica como as principais estruturas físicas, instalações técnicas e sistemas que são social, econômica ou operacionalmente essenciais para o funcionamento de uma sociedade ou comunidade, tanto em circunstâncias de rotina como em circunstâncias extremas de uma emergência.

O Marco de Sendai, liderado pela ONU em 2015, é um acordo multilateral para redução de riscos de desastres e de perdas de vidas com a finalidade de proteger a saúde, ativos econômicos, físicos, sociais, culturais e ambientais de pessoas, empresas, comunidades e países. O marco definiu tipos de infraestruturas que considera críticas: infraestrutura de água, transporte e tele-

comunicações, instalações educacionais, hospitais e outras instalações de saúde.

A Comissão da União Europeia definiu a infraestrutura crítica como a "instalação física e de tecnologia da informação, redes, serviços e ativos que, se interrompidos ou destruídos, teriam um impacto sério na saúde, segurança, proteção ou bem-estar econômico dos cidadãos ou no funcionamento eficaz dos governos nos Estados (UE)". Já a Assembleia Geral da ONU de 2016 definiu-as como estruturas físicas, instalações, redes e outros ativos que fornecem serviços essenciais ao funcionamento social e econômico de uma comunidade ou sociedade (UNDRR, 2020).

No Brasil, desde 2018 (Decreto n. 9.573), as infraestruturas críticas são definidas como "instalações, serviços, bens e sistemas cuja interrupção ou destruição, total ou parcial, provoque sério impacto social, ambiental, econômico, político, internacional ou à segurança do Estado e da sociedade". Sua definição considerou os fatores de segurança, de resiliência e das conexões que tornam as infraestruturas dependentes umas das outras, cujos impactos, na eventualidade de danos, podem ocorrer por efeito cascata.

No entanto, as infraestruturas críticas, ainda não se tornaram elementos-chave nas tomadas de decisão. De forma geral, há um "dilema de decisões" sobre as infraestruturas no Brasil, e não somente sobre as infraestruturas críticas. Esse dilema está baseado na contradição de uma decisão que, em condição de desigualdade regional, priorizar infraestruturas já implantadas para novos investimentos pode implicar em não investir em áreas carentes de infraestrutura.

Como priorizar investimentos para resiliência, adaptação, mitigação, transição ou redundância de infraestruturas críticas, ou outras já instaladas, diante de grandes demandas prioritárias não atendidas por infraestruturas convencionais? Como priorizar esses investimentos diante da ausência de infraestrutura básica para setores essenciais da sociedade? Por mais óbvio que sejam as justificativas de segurança, bem-estar e desenvolvimento da adaptabilidade ou manutenção de determinadas infraestruturas, incluindo as infraestruturas críticas, essa decisão sempre será tensionada quando predominarem condições de desigualdades regionais e disparidades socioeconômicas.

Esse cenário, por sua vez, leva a uma necessidade do entendimento da infraestrutura crítica em relação ao seu ativo físico, mas também em relação à sua operação, gestão e manutenção, bem como em relação ao sistema e às redes conectadas a elas e àquelas ainda não atendidas. O foco recai sobre o entendimento desse dilema por conta do federalismo climático, de escalas federativas e da prioridade de investimentos dentro de uma política nacional de desenvolvimento.

## EFEITO CASCATA E A RESILIÊNCIA SISTÊMICA

Danos em sistemas interdependentes têm maior potencial de gerarem efeito cascata nos serviços prestados pelas infraestruturas. O efeito cascata ocorre quando há interrupção do serviço de um componente do sistema que implica na interrupção de outro(s) serviço(s) de outro(s) componente(s) do mesmo sistema ou de outro sistema, do mesmo setor ou de outro setor. Essas falhas podem ocorrer em escala, afetando componentes de mais de um sistema ou setor, desde que estejam integrados e que sejam interdependentes. Também podem ocorrer simultaneamente em duas ou mais redes de infraestruturas independentes, quando causadas por eventos comuns. Uma importante característica dessas ocorrências são as ligações mútuas entre as infraestruturas.

Segundo Rehak, Senovsky, Lovecek e Novotnt (2018), o impacto apresenta diferentes aspectos. Quanto à área de abrangência, caracteriza-se pelo dano no próprio sistema (na infraestrutura) ou na sociedade. Ocorre de forma direta ou indireta, com variações na sua intensidade (parcial em sistemas de ligações fracas; absoluta em sistemas de ligações fortes), com duração de curto, médio e longo prazos, por efeitos simples ou sinérgicos. Os impactos diretos caracterizam-se por interrupções ou falhas em um elemento e/ou setor com incidência direta na sociedade. Os impactos em cascata, por sua vez, ocorrem quando interrupções e falhas se espalham pelos elementos e/ou setores. Por fim, os impactos sinérgicos ocorrem por interrupções ou falhas simultâneas de dois ou mais elementos ou setores. A avaliação dos impactos e do risco de propagação parte do reconhecimento da área onde a infraestrutura está instalada e dos limites de atuação da infraestrutura.

O efeito cascata pode ser dividido em três ordens (Fekete, 2019): espacial, pela abrangência geográfica de seus impactos e efeitos que decorrem dos limites do sistema e se relaciona com a escala de ativos e a escala das redes da infraestrutura; temporal, mensurada pelo período em que o serviço está deficitário ou ausente e podendo variar com o impacto de um evento sobre a infraestrutura, ou mesmo de defasagem de manutenção; e de qualidade do serviço, que pode afetar apenas a infraestrutura ou a rede que ela atende. Nesses casos, o conceito de sistema de sistemas (Ackoff, 1971) é fundamental para compreender a abrangência de cada uma dessas ordens.

Para os sistemas de infraestruturas interdependentes (Val et al, 2019), os maiores níveis de integrações proporcionam efeito cascata mais potencializado. Nele, os nós (pontos de articulações entre partes de um sistema ou entre sistemas como estações, terminais, portos e até cidades, etc.) articulam multicamadas, e a perturbação provocada por um determinado evento sobre esses nós prolifera-se mais rapidamente para os sistemas envolvidos, causando estresses com repercussões não apenas lineares, mas bidirecionais, se propagando por diferentes camadas.

São comuns, por exemplo, efeitos de "*feedback*" nos quais, após os impactos ocorrerem em componentes topologicamente a jusante da fonte da perturbação, também ocorrem impactos em componentes e setores que os subsidiam, ou seja, topologicamente a montante de suas funcionalidades. Para esses sistemas com alto grau de interdependência, a engenharia de resiliência preconiza uso de modelos baseados em redes e grafos para antecipar, absorver, adaptar e recuperar as funções críticas da infraestrutura (Hickford et al, 2018). Contudo, atualmente é depositada muita confiança na prevenção tecnológica de problemas que nem sempre são previsíveis, ocorrem por múltiplas dimensões e se vinculam a decisões pessoais raramente mapeadas por essas tecnologias.

Portanto, identificar as fontes das perturbações é fundamental para identificar os múltiplos riscos aos quais as infraestruturas estão submetidas. Em relação aos riscos climáticos, é importante dimensionar a abrangência dos impactos (Forzieri et al, 2018), porque eventos locais podem ter impacto regional quando

as infraestruturas estiverem associadas, e o efeito cascata ocorre para além dos limites físicos de onde ocorreu o evento. Os riscos isolados ou localmente concentrados, ainda que sejam sobre um único componente de conexão, podem incidir sobre um sistema inteiro, cuja funcionalidade afeta infraestruturas de maior abrangência territorial e operacional. Esse aspecto importa, igualmente, à geopolítica, porque a proteção de infraestruturas críticas não se relaciona exclusivamente ao âmbito intraterritorial, mas às conexões dependentes transterritoriais, ou às interdependências entre serviços que ocorrem para além das fronteiras nacionais ou subcontinentais, por exemplo. Infraestruturas de suprimentos e de serviços básicos que dependem de transposições regionais, internacionais ou continentais ampliam as complexidades da gestão e da proteção das infraestruturas críticas. Diante desses riscos e vulnerabilidades, a proteção de infraestruturas passou a ser considerada prioridade.

Nesse contexto, a proteção referia-se aos estudos de como evitar os danos sobre as infraestruturas, mas não à capacidade da infraestrutura de responder aos problemas. As discussões mais recentes propõem a substituição da ideia de proteção, ou segurança, pela ideia de resiliência (Pursiainen, 2018). Essa, por sua vez, assume um amplo escopo de definições, que abrange a capacidade de um sistema, comunidade, sociedade de enfrentar os perigos ao resistir, absorver, adaptar-se e se recuperar de maneira eficiente, incluída a preservação e restauração de suas estruturas e funções originais e essenciais. Inclui, também, o gerenciamento de crises por atividades preventivas, mitigadoras e de cuidados que precedem a crise, de respostas durante a crise e de recuperação após a crise, minimizando a interrupção de serviços e buscando retomá-los com a maior brevidade.

Pursiainen (2018) apresenta três domínios distintos de resiliência da infraestrutura: social (governos nacionais e locais, comunidades, famílias, etc.); organizacional (empresas ou responsáveis pelas infraestruturas); tecnológico (infraestruturas críticas e seus operadores, bem como fabricantes e fornecedores de serviço de segurança). Esses domínios podem ser interpretados como meios de ação para respostas nos casos de danos.

Se considerarmos aqueles danos relacionados aos eventos extremos mais prejudiciais aos sistemas de infraestruturas (ondas de calor e frio, secas, incêndios florestais, inundações fluviais e costeiras e ciclones), pode-se afirmar que a complexidade em dimensão geográfica (comunitária, local, micro, meso e macrorregional, nacional, internacional), dimensão setorial (pelos vários setores) e dimensão temporal (curto, médio e longo prazos) dos impactos não têm sido acompanhada pelas respostas incrementais ou estruturais vigentes, seja na manutenção de infraestruturas afetadas, seja na pesquisa e concepção de novas infraestruturas.

Assim, a resiliência também deve levar em consideração o inesperado e a preparação para o desconhecido. Como uma síntese da resiliência, a preparação, a mitigação, a resposta e a recuperação são elencadas como as principais fases para reparar os danos e enfrentar os riscos (Shakou et al, 2019). Nesse sentido, alguns elementos foram consolidados como essenciais para a resiliência das infraestruturas (Bruneau et al, 2003): robustez, como a capacidades de os sistemas de infraestruturas suportarem determinados níveis de estresse ou demanda sem perder suas funções ou se romperem; redundância, como a existência de elementos ou sistemas substituíveis capazes de assumirem funções no caso de falhas, rupturas, degradação ou perda de funcionalidade; adaptação, como a capacidade de responder a um evento pela identificação do problema, definição de prioridades e mobilização de recursos (humanos, econômicos, etc.); rapidez, como a capacidade de restabelecer as funcionalidades para conter perdas e evitar maiores danos.

Uma visão complementar é a abordagem de sistemas socioecológicos de resiliência, que descreve as características baseadas em flexibilidade, modularidade, diversidade, abertura para aprendizado, inovação e transformação da infraestrutura (Shakou et al, 2019). Essa abordagem reconhece que os sistemas sociotécnicos de infraestruturas, produzidos artificialmente, estão muito fortemente vinculados aos recursos que eles fornecem. Por isso, justifica-se a incorporação dos ecossistemas e dos seus serviços como parte da resiliência dessas infraestruturas sociotécnicas. Sinteticamente, os autores defendem a resiliência das infraestruturas críticas por ações em curto, médio e longo prazo, baseadas

em: antecipação, absorção, adaptação e recuperação das infraestruturas em curto tempo; investimento em inovação em médio e longo tempo; transformação e mitigação em longo tempo; e integração entre ecossistemas, serviços ecossistêmicos e infraestruturas baseadas na natureza.

Uma visão específica sobre as redes de infraestrutura crítica urbana divide a resiliência em duas categorias: uma, substituta dos conceitos de confiabilidade, robustez, capacidade de reserva e sustentabilidade; e outra, incorporando os conceitos de adaptabilidade, capacidade de absorção e capacidade de recuperação. Segundo essa visão, as redes se vinculam a quatro tipos de perigos: desastres, como terremotos, com longos períodos de retorno e graves danos; condições anormais de operação por falhas, rupturas, colapsos; destruição induzida por produção humana, como atentados, erros, etc.; e expansão da rede devido à demanda de consumo que provoca desequilíbrio no fornecimento do produto ou do serviço. Diante disso, há três medidas possíveis: alocação de recursos; redundância, reforço de componentes e ajuste de topologias de redes; e estratégias organizacionais (Liu; Song, 2020).

Por fim, a resiliência da infraestrutura crítica tem sido abordada por quatro vieses principais (Cantelmi; Di Gravio; Patriarca, 2021): tecnocêntrica, baseadas nos fatores tecnológicos; organizacional, pela dimensão social da infraestrutura; comunitária, pela capacidade de comunidades lidarem com imprevistos, evitarem desastres e se recuperarem; e urbana, específica em cidades e ambientes urbanos relacionada à sustentabilidade, adaptação às mudanças climáticas, redução de riscos e desastres.

Para a UNDRR (2022), a resiliência das infraestruturas relaciona-se à capacidade de prevenção, antecipação, recuperação e adaptação oportuna e eficaz das estruturas e suas funções por enfoque sistêmico sobre todos os setores e atividades que as envolvem. O objetivo é ter alcance transdisciplinar sobre o sistema de sistemas. Com essa finalidade, a UNDRR advoga pela resiliência sistêmica como uma propriedade de um sistema de infraestruturas organizado de modo a proporcionar serviços críticos mesmo diante das ameaças endógenas e exógenas, ainda que diante de adição, modificação ou eliminação de seus componentes.

Ao nosso ver, a perspectiva sobre as infraestruturas é de estarem cada vez mais conectadas, sejam elas dos mesmos setores ou de setores distintos, o que eleva o grau de interdependências e as submetem a níveis mais complexos de criticidades deixando-as vulneráveis a riscos pelo efeito cascata. Diante desse quadro, a resiliência sistêmica é um horizonte coerente e desejável, sobretudo para enfrentar os riscos climáticos. Isso porque há severas lacunas sobre o tratamento integrado entre múltiplos riscos e múltiplas infraestruturas, que demandam uma abordagem sistêmica intersetorial (Verschuur et al, 2024), justificando a resiliência sistêmica como um caminho para o enfrentamento das consequências adversas que ocorrem sobre sistemas de infraestruturas e que submetem serviços, pessoas e natureza a maiores vulnerabilidades e danos.

## FRAGMENTAÇÃO INSTITUCIONAL E A GOVERNANÇA TERRITORIAL

Resiliência não deve ser adotada como um termo genérico e aplicável a ativos, serviços, instituições ou pessoas, indistintamente. Embora seja uma definição amplamente difundida e reproduzida genericamente (Monstadt; Schmidt, 2019), o cuidado com as especificidades de cada âmbito de abordagem é fundamental. No caso das infraestruturas, a *Coalition for Disaster Resilient Infrastructure* (CDRI, 2025) enumera oito pontos-chave para lhes garantir capacidade de enfrentar os eventos decorrentes das mudanças climáticas. São eles: avaliação dos riscos de infraestrutura e a mensuração dos benefícios da resiliência; preparação para a recuperação e reconstrução dos ativos; absorção, resposta e recuperação no menor tempo; incorporação de novas tecnologias; garantia de financiamento de infraestrutura resiliente por instrumentos específicos; coordenação entre agências governamentais, proprietários de ativos de infraestrutura, operadores, empresas e comunidades; e formulação de políticas, estruturas de governança, orientações técnicas padronizadas e instrumentos financeiros para a transição e adaptabilidade das infraestruturas.

Contudo, e diante de uma integração cada vez maior das infraestruturas, sua gestão e governança encontram-se num pro-

cesso intenso de fragmentação, dificultando discussões, ações, financiamentos multilaterais ou articulados. Embora não seja um problema eminentemente tecnológico, é um problema técnico, porque envolve as questões emanadas das diferentes instituições e instâncias responsáveis pelas tomadas de decisão. O contexto institucionalmente fragmentado decorre por diferentes processos, mas converge para problemas comuns de concepção, uso, gestão e manutenção das infraestruturas.

A fragmentação institucional das infraestruturas ocorre, principalmente, pela concessão ou privatização dos ativos e serviços de interesse público que implica numa articulação entre entes públicos e privados sobre um campo que antes era considerado de monopólio estatal e, portanto, gerido por um único ente. A descentralização ou o deslocamento das responsabilidades implica em mudanças na gestão e operação das infraestruturas, cujos impactos negativos, em vários casos, têm sido explicados pelas Teoria do Acidente Normal (Perrow, 1984) ou pela Teoria da Alta Confiabilidade (Weick; Sutcliffe; Obstfeld, 1999), que se dedicam a compreender como ocorrem e como são tratados os riscos de sistemas de alta complexidade interativa nesses contextos.

No campo internacional, essa tendência de fragmentação institucional é sintetizada pela expressão *New Public Management*, que tem sido utilizada para denominar um conjunto de iniciativas alinhadas aos perfis neoliberais de operação e manutenção das infraestruturas pela pulverização dos agentes públicos e privados responsáveis por elas (Cedergren; Johansson; Hassel, 2018). Essa denominação busca contribuir para o entendimento dos padrões vigentes nas relações institucionais, organizacionais, contratuais e de regulação dos ativos e serviços de infraestrutura, sobretudo nas ocasiões de respostas aos impactos de eventos climáticos.

Em geral, os eventos de maior impacto, como grandes desastres, tendem a convergir os responsáveis para respostas rápidas e eficientes em curto e médio prazo, mesmo quando não há recursos previstos no planejamento. As pequenas ocorrências, contudo, carecem de ações integradas, que não mobilizam a mesma atenção que grandes eventos, e por isso acumulam-se, gerando transtornos e impactos sociais proporcionalmente maiores que seus impactos

tecnológicos. Esse quadro é agravado pela sobreposição de funções que decorre não apenas entre ente público e privado, mas entre diferentes níveis dos entes públicos (como os entes federativos União, estados e municípios), entre empresas privadas concorrentes, bem como entre os provedores de serviços integrados (como segurança, energia, comunicação, água, etc.).

Em relação às responsabilidades, elas são determinadas contratualmente, de formas compartilhadas ou não, mas, nos casos de exceção, há impasses que precisam ser resolvidos e não raras vezes são judicializados. Essa condição vincula as vulnerabilidades das infraestruturas a fatores endógenos, como a demanda por controlar o aumento da complexidade de interdependências, que potencializam os fatores exógenos (mudanças climáticas, ataques, etc.). Assim, o efeito cascata de danos passa de pequenas interferências em subsetores ou em componentes à interrupção de uma cadeia complexa de serviços. Assim, a fragmentação institucional dificulta um sistema articulado de decisões simultâneas e solidárias frente a esses problemas, pois frequentemente opera por responsabilidades insuladas e/ou concorrentes.

A desintegração institucional do controle da infraestrutura projeta-se fisicamente sobre uma determinada área, fragmentando o território e tornando-o mais vulnerável aos efeitos extremos ou menos resilientes na recuperação das funções e dos serviços de bem-estar, segurança e desenvolvimento. Perturbações no sistema reforçam suas fragilidades e, num quadro de fragmentação institucional, são potencializadas em cadeia pela fragmentação que também ocorre no âmbito do planejamento, das regulações e das decisões.

A resiliência de sistemas complexos ou de sistema de sistemas depende do bom funcionamento de outras infraestruturas (organizacional, informacional, computacional, etc.). A ingerência ou o sombreamento da gestão dessas infraestruturas pela fragmentação institucional pode comprometer as ações sobre a principal finalidade de manter as demais infraestruturas operando. Num contexto de forte interdependência entre setores em ambiente fragmentado da gestão das infraestruturas e de tomada de decisão, a vulnerabilidade das infraestruturas-fim é maior.

Os dados desintegrados, a pesquisa descolada dos debates empíricos e os investimentos determinados por fatores setoriais reforçam essa realidade de fragmentação institucional. A adaptação e a transição das infraestruturas têm custos adicionais e as prioridades desencontradas das instituições não colabora para convergência de ações. Também não colabora a insegurança jurídica de maiores investimentos justificados por incertezas, isto é, por fenômenos que ainda não ocorreram ou que não se pode mensurar se e como ocorrerão.

Por isso, em caso de danos, percebe-se a microeficiência vinculada ao cumprimento das normas e protocolos institucionais diante da macroineficiência na retomada dos serviços. Ou seja, procedimentos internos insulados são eficientemente cumpridos, mas não proporcionam a solução do problema, assim como a resiliência organizacional orientada por condutas e princípios, muitas vezes, não alcança, na prática, a resiliência de sistemas complexos, que envolve uma multiplicidade e uma simultaneidade de organizações e agentes. Por fim, a alta confiança depositada nos contratos de concessões tem provocado a "comoditização" da segurança dos ativos e dos serviços frente às mudanças regulatórias condicionadas pela abertura do mercado das infraestruturas (Cedegren et al). Em várias ocasiões, as barreiras para a resiliência (para proporcionar robustez, redundância, confiabilidade e flexibilidade a um dado sistema) reside nos impasses políticos, institucionais, informacionais e culturais.

A transformação do ativo físico infraestrutural em ativo econômico ou financeiro, também derivada da lógica do mercado e condizente com a *New Public Management*, reposiciona a infraestrutura como um meio de lucratividade, submetendo-a a instabilidades do arranjo financeiro e do aumento da competitividade pela diminuição de investimentos e potencialização do uso. Por isso, essa pauta requer ser compreendida de forma mais aprofundada e por canais mais amplos de governança, pois a transformação da infraestrutura em ativo econômico e financeiro, em vários casos, afasta-a de sua função de prover a universalidade do bem-estar social.

Ademais, mesmo com os acordos de ajustes fiscais e parcerias público privadas, ao Estado é atribuída a responsabilidade de

garantir esse bem-estar que, entre outros caminhos, depende da provisão de serviços e de infraestrutura. Por isso, o planejamento e a regulação estatal ainda são um caminho confiável de controle e de distribuição dos serviços de forma equitativa a fim de atender a diferentes interesses. Esses aspectos confrontam-se com uma atuação mais incisiva do mercado (sobre a propriedade de infraestruturas e terras); com uma mudança funcional da autoridade, de recursos e das habilidades governamentais; com a ampliação do domínio do mercado sobre tecnologias, ativos e dados; e com a internacionalização dos prestadores de serviços e das empresas responsáveis pela construção e/ou operacionalização das infraestruturas (Pursiainen, 2018).

Esse quadro confirma a necessidade de uma articulação do planejamento público por um sistema de governança que responda às novas demandas das infraestruturas e aos velhos problemas de desigualdade e segregação. É compreensível, que para tratar das redes técnicas, será necessário reorganizar as redes institucionais, de dados, de pesquisas, de organizações e de pessoas. A demanda pela resiliência pode estar centrada na visão integral das infraestruturas de múltiplos setores e de variadas dimensões compreendidas a partir do território que, afinal, é onde incidem os principais impactos e onde se fixam pessoas e natureza.

A ideia de uma governança territorial é fundamental para coordenar diferentes agentes e organizações e contribuir para olhar integrado sobre a diversidade tecnológica, a variedade de atores, as diferentes formas de gestão dos ativos e serviços e as respostas aos impactos, danos e vulnerabilidades provocados por, entre outras fontes, as mudanças climáticas. A governança territorial seria uma governança apoiada por um sistema de planejamento público que absorva a sociedade organizada, a gestão pública, o mercado, a academia e organismos multilaterais sob uma autoridade territorial. Portanto, uma autoridade que detenha a atribuição de proporcionar uma governança do território pelas infraestruturas considerando-a uma importante estratégia de o Estado garantir bem-estar.

O aumento não só da resiliência, mas também da qualidade e da garantia da continuidade das infraestruturas, está relacionada a uma governança política, solidária e propositiva. Pode-se enten-

dê-la como uma governança de rede (pelo reconhecimento das interdependências entre os agentes envolvidos), buscando evitar a governança hierárquica (de comando e controle), a governança de mercado (de competitividade) ou a governança comunitária (estritamente privada) (Knodt; Fraune; Engel, 2022). Instituir uma governança de rede é reconhecer a centralidade da institucionalidade, do interesse comum e do aspecto territorial fundamentada na pesquisa, na proposição e no monitoramento das infraestruturas com capacidade institucional de promover inovações e adaptações aos sistemas existentes. É, também, compreender de forma integral e por ações descentralizadas a estrutura dos serviços e das infraestruturas de maior criticidade, reposicionando-os ao interesse comum.

## NOTAS CONCLUSIVAS: PORQUE NO TERRITÓRIO?

Nas políticas públicas, o território tem servido como meio de políticas setoriais; como fim de planos nacionais; como lugar de regulação; e como estratégia de disputa por direitos (Silva, 2013). Na provisão de infraestrutura, muitas vezes é considerado como passivo fundiário; barreira natural; repositório de demanda a ser explorada (recursos naturais, pessoas, produtos); ou condicionante técnica para encaminhamento de redes e sistemas. O que se vislumbra para o planejamento das infraestruturas é o território como base para a governança e elemento central da tomada de decisão para superar o "dilema de decisões". Afinal, o território é o lugar onde ocorre a integração dos componentes infraestruturais; de onde emergem as diferenças e desigualdades; sobre o qual as infraestruturas incidem; e no qual ocorrem e se propagam os danos físicos, institucionais, sociais de múltiplos riscos.

O pleito do território como base da governança das infraestruturas busca evitar uma articulação seletiva de ações (Macrorie; Marvin, 2019), que privilegia setores e classes específicas. O que se pretende com uma autoridade territorial baseada na infraestrutura é romper as decisões locacionais privilegiadas, exclusivamente competitivas, e apontar para a integração de fato das instituições e das soluções.

Tendo a infraestrutura como foco, o desafio contemporâneo está em enfrentar a capacidade limitada de concessionárias e autoridades locais de gerir conflitos e danos incertos sobre infraestruturas; enfrentar a fragilidade do pacto federativo na gestão e no investimento de infraestruturas compartilhadas; restaurar uma visão articulada sobre áreas conurbadas e/ou regionalizadas, como as regiões metropolitanas e os arranjos populacionais; reposicionar o papel do Estado como principal responsável pela concepção dos serviços públicos de interesse comum, bem-estar, segurança e desenvolvimento, sobretudo das infraestruturas críticas; integrar infraestrutura ao desenvolvimento socioeconômico, uso do solo, conservação ambiental e combate à miséria; e superar paradigmas técnicos e valores sociais pela adaptabilidade permanente das infraestruturas frente às incertezas do presente.

O objetivo é evitar o paradoxo das interdependências (Monstadt; Schmidt, 2019). Esse paradoxo ocorre pela divergência entre a interdependência de infraestruturas e a fragmentação institucional. As complexidades da integração e das dependências funcionais entre infraestruturas e serviços, bem como o aumento potencial de efeito cascata, geram vulnerabilidades e riscos. Seus impactos, contudo, são tratados por soluções incrementais (quando deveriam ser por soluções estruturais), dada a fragmentação institucional, com dificuldades de interromper a propagação de danos, seja entre setores, seja entre fronteiras territoriais. Esse paradoxo, segundo os autores, constitui-se pela desagregação das infraestruturas em subdomínios de mercado, geridas de forma independente setorial e territorialmente, num momento de ampla conectividade.

Nesse sentido, uma governança territorial vinculada às infraestruturas poderá coordenar e compatibilizar agendas; enfrentar conflitos entre as infraestruturas e entre infraestruturas, sociedade e meio ambiente; priorizar investimentos; assumir as incertezas, os riscos, a resiliência e a adaptabilidade na concepção das infraestruturas; controlar e disponibilizar dados; incentivar pesquisa; monitorar e avaliar as infraestruturas; e inovar na sua concepção. Pode, também, baseada numa revisão do que pode ser o planejamento das infraestruturas, do ponto de vista territorial, colaborar para inseri-la na realidade do processo de urbanização brasileiro.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS


ACKOFF, R. L. Towards a system of systems concepts. **Management Science**, vol. 17, p. 661-671, 1971.

BRASIL. Decreto n. 9.573 de 22 de novembro de 2018.

BRUNEAU, M.; CHANG, S. E.; EGUCHI, R. T.; LEE, G. C.; O'ROURKE, T. D. REINHORN, A. M.; SHINOZUKA, M.; TIERNEY, K.; WALLACE, W. A.; VON WINTERFELDT, D. A framework to quantitatively assess and enhance the seismic resilience of communities. **Earthquake Spectra**, 19(4), p. 733–752, 2003.

CANTELMI, Raffaele; DI GRAVIO, Giulio; PATRIARCA, Riccardo. Reviewing qualitative research approaches in the context of critical infrastructure resilience. **Environment Systems and Decisions**, v. 41, p. 341–376, 2021.

CDRI (Coalition for Disaster Resilient Infrastructure). **Executive sumary. Global Infrastructure Resilience 2025. Capturing the resilience dividend**. New Delhi, India: CDRI. 2025.

CEDERGREN, Alexander; JOHANSSON, Jonas; HASSEL, Henrik. Challenges to critical infrastructure resilience in an institutionally fragmented setting. **Safety Science**, v. 110, p. 51–58, 2018.

DVOŘÁK, Zdeněk; SVENTEKOVÁ, Eva; ŘEHÁK, David; CEKEREVAC, Zoran. Assessment of Critical Infrastructure Elements in Transport. **Procedia Engineering**, v. 187, p. 548–555, 2017.

FEKETE, Alexander. Critical infrastructure and flood resilience: Cascading effects beyond water. **WIREs Water**, v. 6, n. 5, p. e1370, 2019.

FORZIERI, Giovanni; BIANCHI, Alessandra; SILVA, Filipe Batista e; HERRERA, Mario A. Marin; LEBLOIS, Antoine; LAVALLE, Carlo; AERTS, Jeroen C. J. H.; FEYEN, Luc. Escalating impacts of climate extremes on critical infrastructures in Europe. **Global Environmental Change**, v. 48, p. 97–107, 2018.

HARAŠTA, Jakub. Legally critical: Defining critical infrastructure in an interconnected world. **International Journal of Critical Infrastructure Protection**, v. 21, p. 47–56, 2018.

HICKFORD, Adrian J.; BLAINEY, Simon P.; HORTELANO, Alejandro Ortega; PANT, Raghav. Resilience engineering: theory and practice in interdependent infrastructure systems. **Environment Systems and Decisions**, v. 38, p. 278–291, 2018.

HUDDLESTON, Pippa; SMITH, Tim; WHITE, Iain; ELRICK-BARR, Carmen. Adapting critical infrastructure to climate change: A scoping review. **Environmental Science and Policy**, v. 135, p. 67–76, 2022.

KNODT, Michèle; FRAUNE, Cornelia; ENGEL, Alice. Local governance of critical infrastructure resilience: Types of coordination in German cities. **Journal of Contingencies and Crisis Management**, v. 30, p. 307–316, 2022.

LIU, Wei; SONG, Zhaoyang. Review of studies on the resilience of urban critical infrastructure networks. **Reliability Engineering and System Safety**, 1993, p. 1-16, 2020.

MACRORIE, Rachel; MARVIN, Simon. Bifurcated urban integration: The selective dis- and re-assembly of infrastructures. **Urban Studies**, v. 56(11), p. 2207-2224, 2019.

MONSTADT, Jochen; SCHMIDT, Martin. Urban resilience in the making? The governance of critical infrastructures in German cities**. Urban Studies**, v. 56(11), p. 2353-2371, 2019.

PERROW, C. **Normal Accidents: Living with High-Risk Technologies**. New York: Basic Books, 1984.

PURSIAINEN, Christer. Critical infrastructure resilience: A Nordic model in the making? **International Journal of Disaster Risk Reduction**, v. 27, p. 632–641, 2018.

REHAK, David; SENOVSKY, Pavel; Hromada, Martin; LOVECEK, Tomas; NOVOTNT, Petr. Cascading Impact Assessment in a Critical Infrastructure System. **International Journal of Critical Infrastructure Protection**, v. 22, p. 125–138, 2018.

RINALDI, Steven M.; PEERENBOOM, James P.; KELLY, Terrence K. Identifying, Understanding, and Analyzing Critical Infrastructure Interdependencies. **IEEE Control Systems Magazine**, v. 21, n. 6, p. 11–25, 2001.

SHAKOU, Louisa Marie; WYBO, Jean-Luc; RENIERS, Genserik; BOUSTRAS, Georgios. Developing an innovative framework for enhancing the resilience of critical infrastructure to climate change. **Safety Science**, v. 118, p. 364–378, 2019.

SILVA, Sandro Pereira. Considerações analíticas e operacionais sobre a abordagem territorial em políticas públicas. In: IPEA. **Brasil em desenvolvimento 2013: Estado, planejamento e políticas públicas** (editores: Rogério Boueri, Marco Aurélio Costa). Brasília: Ipea, 2013.

UNDRR (UN Office for Disaster Risk Reduction). **Making critical infrastructure resiliente. Ensuring continuity or service. Policy and regulations in Europe and Central Asia**. Belgium: UNDRR, 2020.

UNDRR (UN Office for Disaster Risk Reduction). **Principios para uma infraestrutura resiliente**. Genebra: UNDRR, 2022.

VAL, Dimitri V.; YURCHENKO, Daniil; NOGAL, Maria; O'CONNOR; Alan. Climate Change-Related Risks and Adaptation of Interdependent Infrastructure Systems. *In:* **Climate Adaptation Engineering**. [s.l.]: Elsevier, 2019. cap. 7, p. 207-242.

VERSCHUUR, Jasper et al. Quantifying climate risks to infrastructure systems: A comparative review of developments across infrastructure sectors. **PLOS Climate**, v. 3, n. 4, e0000331, 2024.

WEICK, K. E.; SUTCLIFFE, K. M., OBSTFELD, D. Organizing for high reliability: processes of collective mindfulness. **Res. Organizational Behav**, 21, p. 81–123, 1999.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), Brasil. Processo nº 2022/01583-9. Este trabalho foi realizado com o apoio do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - Brasil (CNPq) - Processo nº 307498/2023-9.

# INFRASTRUCTURE IN FOCUS: PLANNING FOR CLIMATE CHANGE

JEFERSON TAVARES

The impacts of climate events on national infrastructure have alerted managers, the market, society, academia, and social and multilateral organizations to the damage they cause. These impacts present challenges that have been little or hardly measured in the history of infrastructure provision, given the unprecedented nature of their systemic dimensions, their wide geographical scope, and their extreme intensity. Furthermore, when observed more carefully, they confirm or reinforce pre-existing and historically neglected problems, vulnerabilities, and risks.

At the same time, the current landscape of transformations in technology, governance, and infrastructure maintenance has raised questions about the conceptual and empirical paradigms that underpin their designs. The strongest evidence relates to the damage that infrastructure suffers as a result of climate change and, conversely, the damage that infrastructure causes to the natural and built environment when it breaks down or collapses. Risks of disruptions and collapses affect users and regions dependent on infrastructure services on a daily basis, with cascading effects given the systemic nature of their functionalities and operations. Conditions that require analysis from different perspectives, involving technological, economic, or institutional aspects, but without disconnecting them from the territory.

What are presented as introductory notes to the discussion proposed in this book are some concepts that directly or indirectly permeate the chapters and that will be addressed here in light of planning, with a view to building common references for infrastructure resilience practices. In addition, they are also a reflection on infrastructure and climate change, considering urgent demands,

but also desired transitions in the medium and long term. With the aim of focusing on the relationship between technological and social issues, the proposed reflections follow the central argument that technology is not neutral and, when applied through political decisions and scientifically based, carries the responsibility of transforming the territory.

In this sense, to support the discussions, we start from some technical characteristics of infrastructures that have a systemic impact on society and that can contribute to a review of how they are adopted for infrastructure planning practices, especially under conditions resulting from climatic events. Thus, we propose a brief analysis of infrastructures by technical-social binomials in order to articulate a critical view of the properties of infrastructures that are derived from organizational decisions and that, therefore, take into account political, economic, social, cultural, and other constraints.

The following will be analyzed: the interdependencies between infrastructures that cause systemic complexities in service provision and whose risks point to the need to understand the criticality of infrastructures (the interdependencies and critical infrastructure binomial); the cascading effects that amplify the impacts of collapses and disruptions on the services provided and on their operating and maintenance costs and require resilience strategies (the cascading effects and systemic resilience binomial); and institutional fragmentation, which has evolved from an already exacerbated sectoralism to a multiplicity of agents with different functions and diverse interests, demonstrating the need to rethink infrastructure governance (institutional fragmentation and territorial governance). We will present them from a planning perspective, with the aim of supporting an agenda of conceptual reviews of infrastructure use.

## *INTERDEPENDENCIES AND CRITICAL INFRASTRUCTURE*

Interdependencies are interactions that occur between infrastructure components and sectors, and are vital to maintaining their operations. Increased connectivity between infrastructures and intersectoral dependence between them create systems of sys-

tems, in which the failure of one component prevents or damages the functioning of another component. Once interdependencies have been identified, it is possible to classify critical infrastructure, i.e., infrastructure that is most relevant to the functioning of different integrated systems and whose maintenance is a priority for people's safety and well-being.

Interdependencies can occur through different connections in the physical, automation or cybernetic, geographical, and decision-making or logical connection spheres (Rinaldi, Peerenboom, and Kelly, 2001). They have great potential to transmit failures from one sector to another, especially in complex chains, amplifying the spread of damage. The dimensions of interdependence are linked to the operation, the characteristics of the infrastructure, the type of failure, the current coupling, the response to the problem, and the environment. The trend toward greater digital interaction between infrastructures and the deregulation of their uses reinforce the spread of risks, affecting an increasing number of people.

Specifically for transportation, the importance of classifying potential threats arising from dependencies between the state of infrastructure and its vulnerabilities takes into account sectoral criteria (traffic intensity, recovery costs, economic impact) and cross-cutting criteria (impacts on human life, the economy, and the environment) (Dvorák *et al.*, 2017). Greater integration with other sectors (energy, water, communications, automation, logistics, etc.) exacerbates potential risks and makes systems even more vulnerable to collapse in the face of climatic and/or extreme events.

These risks have required defining—at the international, continental, national, and regional levels—which infrastructure vulnerabilities pose the greatest damage to services that are strategic to the functioning of society. These infrastructures have been classified as critical given their importance to the systems, networks, and chains on which (or with which) they operate. The definitions of critical infrastructure and its classifications began with the understanding that infrastructures become more vulnerable with increased integration between their operation and technological supports that are dependent on complex systems, whose failure would affect a set of interdependent services.

This perception has shifted to the risks of destruction of state facilities or essential services, such as water, electricity, communication, or transportation systems, related to terrorist attacks, especially after the September 11, 2001 attacks. Currently, approaches to critical infrastructure vulnerabilities in relation to climate-related impacts, such as mass destruction of urban and regional infrastructure or disruption of essential services by extreme events, are common.

Strictly speaking, critical infrastructure refers to infrastructure that, over time, becomes vital to society, with different classifications by country and region. In other words, the degree of criticality depends on the order of priority of a given infrastructure that requires protection and security to ensure its operability, the operability of those infrastructures that depend on it, and those that influence it. The degree of criticality is also important in determining rapid service recovery actions in the face of damage caused by different sources of risk and vulnerability. It is linked to physical assets, but also to legal, management, and cyber aspects whose risk affects security, the national economy, and public health.

Infrastructures that are considered critical are generally those that are linked to the basic functioning of society and that guarantee essential supplies and services. Given the importance of their operations and the high costs of their implementation, they are designed and built to have a long service life. Therefore, these infrastructures are located in areas undergoing major transformations and were designed without taking into account radical contemporary changes (Huddleston; Smith; White, 2022). As a result, they are subject to unpredictable conditions of environmental change and extreme events, demonstrating difficult adaptability and requiring complex and costly strategies for their protection.

In their literature review, Huddleston, Smith, and White (2022) identified that certain sectors, such as energy, transportation, water, and communications, are most often considered critical, although housing, facilities for the elderly and early childhood, legal systems, the construction industry, media, and research are also classified as critical sectors. Interconnectivity has been the predominant factor in defining its degree of criticality, but it is not

the only characteristic, being accompanied by the investment factor, assets in different jurisdictions, the presence of different financing and owners, long-life assets, and the aging of components. In this context, physical systems are prioritized in definitions because they are linked to a strong economic bias, although multidimensionality (physical and social systems) is perceived as critical to the functioning of society, especially for social and cultural well-being.

In this review, the authors identify four types of critical infrastructure: physical ("hard infrastructure"), related to traditional production by service provider systems and assets with high dependence on connections between sectors; green (or nature-based) infrastructure, considered by the environmental elements (natural or built) that provide ecosystem services and is advocated as an alternative to physical infrastructure, especially in relation to climate change; institutional infrastructure, related to human systems that support the functioning of physical infrastructure, such as intangible systems like a skilled workforce, effective policies, and interinstitutional relationships, all grouped under the term "socio-technical"; and cultural infrastructure, also involving intangible systems, such as people and communities with local knowledge, a sense of community, connection to a place, cultural elements, and organically created elements and identities.

As the authors themselves conclude, there is no consensus on the definition of critical infrastructure, but there are some general converging understandings regarding the guarantee of well-being, economic activities, and the security of society. And, in some cases, they are defined based on the negative impact on their operation, rather than their everyday functionality. Its definitions and determinations must also be considered not only at the national level (in line with the continental level), but also at the regional level (in line with the local level), by recognizing the scalar relationships of its influence between federal levels and at the international level. The cultural aspects of critical infrastructure, for example, can only be identified in their territorial understanding by multi-criteria methods.

There is also the concept of critical urban infrastructure networks (Liu; Song, 2020), which involves water, sewage, gas, trans-

portation, electricity, and communication networks. This concept confirms two findings: the first is the need to differentiate impacts based on the classification of the territory, whether urbanized or non-urbanized, as this differentiation leads to the interpretation of certain priorities (such as sewage in urban areas or the economy in a more general context); the second is about the level of criticality to be considered depending on the scope of people's daily lives (such as the importance of transportation for emergency assistance in the event of disasters, or gas for heating in extreme weather events).

In 2009, the United Nations Office for Disaster Risk Reduction (UNDRR) defined critical infrastructure as the key physical structures, technical facilities, and systems that are socially, economically, or operationally essential to the functioning of a society or community, both in routine circumstances and in extreme circumstances of an emergency.

The Sendai Framework, led by the UN in 2015, is a multilateral agreement for disaster risk reduction and loss of life with the aim of protecting the health, economic, physical, social, cultural, and environmental assets of people, businesses, communities, and countries. The framework defined types of infrastructure that it considers critical: water, transportation, and telecommunications infrastructure, educational facilities, hospitals, and other health facilities.

The European Union Commission has defined critical infrastructure as "physical and information technology facilities, networks, services, and assets that, if disrupted or destroyed, would have a serious impact on the health, safety, security, or economic well-being of citizens or the effective functioning of governments in EU Member States." The 2016 UN General Assembly defined them as physical structures, facilities, networks, and other assets that provide essential services for the social and economic functioning of a community or society (UNDRR, 2020).

In Brazil, since 2018 (Decree No. 9,573), critical infrastructure has been defined as "facilities, services, assets, and systems whose total or partial interruption or destruction would cause serious social, environmental, economic, political, international, or security impacts on the state and society." Its definition took into account the factors of safety, resilience, and connections that make

infrastructures dependent on each other, whose impacts, in the event of damage, can occur through a cascading effect.

However, critical infrastructure has not yet become a key factor in decision-making. In general, there is a "decision dilemma" regarding infrastructure in Brazil, and not just critical infrastructure. This dilemma is based on the contradiction of a decision that, in conditions of regional inequality, prioritizing existing infrastructure for new investments may mean not investing in areas lacking infrastructure.

How to prioritize investments for resilience, adaptation, mitigation, transition, or redundancy of critical infrastructure, or other infrastructure already in place, in the face of major priority demands not met by conventional infrastructure? How can these investments be prioritized in the absence of basic infrastructure for essential sectors of society? However obvious the justifications of security, well-being, and the development of adaptability or maintenance of certain infrastructure, including critical infrastructure, may be, this decision will always be fraught with tension when conditions of regional inequality and socioeconomic disparities prevail.

This scenario, in turn, leads to a need to understand critical infrastructure in relation to its physical assets, but also in relation to its operation, management, and maintenance, as well as in relation to the system and networks connected to them and those not yet served. The focus is on understanding this dilemma due to climate federalism, federal scales, and investment priorities within a national development policy.

## *CASCADING EFFECT AND SYSTEMIC RESILIENCE*

Damage to interdependent systems has a greater potential to generate a cascading effect on the services provided by the infrastructure. A cascading effect occurs when there is an interruption in the service of one component of a system, which leads to the interruption of other services of other components of the same system or of another system, in the same sector or in another sector. These failures can occur on a large scale, affecting compo-

nents of more than one system or sector, provided that they are integrated and interdependent. They can also occur simultaneously in two or more independent infrastructure networks when caused by common events. An important feature of these occurrences is the mutual connections between infrastructures.

According to Rehak, Senovsky, Lovecek, and Novotnt (2018), the impact has different aspects. In terms of scope, it is characterized by damage to the system itself (infrastructure) or to society. It occurs directly or indirectly, with variations in intensity (partial in weak link systems; absolute in strong link systems), with short, medium, and long-term duration, through simple or synergistic effects. Direct impacts are characterized by interruptions or failures in an element and/or sector with a direct impact on society. Cascading impacts, in turn, occur when disruptions and failures spread across elements and/or sectors. Finally, synergistic impacts occur due to simultaneous interruptions or failures of two or more elements or sectors. The assessment of impacts and the risk of propagation is based on recognition of the area where the infrastructure is installed and the limits of the infrastructure's operation.

The cascading effect can be divided into three orders (Fekete, 2019): spatial, due to the geographical scope of its impacts and effects that arise from the limits of the system and are related to the scale of assets and the scale of infrastructure networks; temporal, measured by the period during which the service is deficient or absent and may vary with the impact of an event on the infrastructure, or even maintenance delays; and service quality, which may affect only the infrastructure or the network it serves. In such cases, the concept of a system of systems (Ackoff, 1971) is fundamental to understanding the scope of each of these orders.

For interdependent infrastructure systems (Val et al, 2019), higher levels of integration provide a more powerful cascading effect. In it, nodes (points of articulation between parts of a system or between systems such as stations, terminals, ports, and even cities, etc.) articulate multiple layers, and the disruption caused by a given event on these nodes spreads more quickly to the systems involved, causing stresses with not only linear but bidirectional repercussions, propagating through different layers.

For example, feedback effects are common, in which, after impacts occur in components topologically downstream from the source of the disturbance, impacts also occur in components and sectors that support them, i.e., topologically upstream from their functionalities. For these highly interdependent systems, resilience engineering recommends the use of network - and graph--based models to anticipate, absorb, adapt, and recover critical infrastructure functions (Hickford et al., 2018). However, too much trust is currently placed in technological prevention of problems that are not always predictable, occur across multiple dimensions, and are linked to personal decisions that are rarely mapped by these technologies.

Therefore, identifying the sources of disruption is essential to identifying the multiple risks to which infrastructure is subject. With regard to climate risks, it is important to assess the extent of the impacts (Forzieri et al, 2018), because local events can have a regional impact when infrastructures are interconnected, and the cascading effect occurs beyond the physical limits of where the event occurred. Isolated or locally concentrated risks, even if they affect a single connection component, can impact an entire system, whose functionality affects infrastructure with a broader territorial and operational scope. This aspect is equally important in geopolitics, because the protection of critical infrastructure is not exclusively related to the intra-territorial sphere, but to dependent trans-territorial connections, or to the interdependencies between services that occur beyond national or subcontinental borders, for example. Supply and basic service infrastructures that depend on regional, international, or continental transpositions increase the complexities of managing and protecting critical infrastructures. Given these risks and vulnerabilities, infrastructure protection has become a priority.

In this context, protection referred to studies on how to prevent damage to infrastructure, but not to the infrastructure's ability to respond to problems. The most recent discussions propose replacing the idea of protection, or security, with the idea of resilience (Pursiainen, 2018). This, in turn, takes on a broad scope of definitions, covering the capacity of a system, community, or

society to cope with hazards by resisting, absorbing, adapting, and recovering efficiently, including the preservation and restoration of its original and essential structures and functions. It also includes crisis management through preventive, mitigating, and care activities that precede the crisis, responses during the crisis, and recovery after the crisis, minimizing service interruptions and seeking to resume them as quickly as possible.

Pursiainen (2018) presents three distinct domains of infrastructure resilience: social (national and local governments, communities, families, etc.); organizational (companies or infrastructure managers); technological (critical infrastructure and its operators, as well as manufacturers and security service providers). These domains can be interpreted as means of action for responses in cases of damage.

If we consider the damage related to extreme events that are most harmful to infrastructure systems (heat waves and cold spells, droughts, forest fires, river and coastal flooding, and cyclones), it can be said that the complexity in terms of geographical dimension (community, local, micro, meso and macro-regional, national, international), sectoral dimension (across various sectors), and temporal dimension (short, medium, and long term) of the impacts has not been matched by the incremental or structural responses currently in place, whether in the maintenance of affected infrastructure or in the research and design of new infrastructure.

Thus, resilience must also take into account the unexpected and preparation for the unknown. As a summary of resilience, preparedness, mitigation, response, and recovery are listed as the main phases for repairing damage and addressing risks (Shakou et al, 2019). In this sense, some elements have been consolidated as essential for infrastructure resilience (Bruneau et al, 2003): robustness, such as the ability of infrastructure systems to withstand certain levels of stress or demand without losing their functions or breaking down; redundancy, such as the existence of replaceable elements or systems capable of taking over functions in the event of failures, breakdowns, degradation, or loss of functionality; adaptation, such as the ability to respond to an event by identifying the problem, setting priorities, and mobilizing resources (human, eco-

nomic, etc.); speed, such as the ability to restore functionality to contain losses and prevent further damage.

A complementary view is the socio-ecological systems approach to resilience, which describes characteristics based on flexibility, modularity, diversity, openness to learning, innovation, and infrastructure transformation (Shakou et al., 2019). This approach recognizes that artificially produced socio-technical infrastructure systems are very strongly linked to the resources they provide. Therefore, it is justified to incorporate ecosystems and their services as part of the resilience of these socio-technical infrastructures. In summary, the authors advocate for the resilience of critical infrastructure through short-, medium-, and long-term actions based on: anticipation, absorption, adaptation, and recovery of infrastructure in the short term; investment in innovation in the medium and long term; transformation and mitigation in the long term; and integration between ecosystems, ecosystem services, and nature-based infrastructure.

A specific view of critical urban infrastructure networks divides resilience into two categories: one replacing the concepts of reliability, robustness, reserve capacity, and sustainability; and another incorporating the concepts of adaptability, absorption capacity, and recovery capacity. According to this view, networks are linked to four types of hazards: disasters, such as earthquakes, with long return periods and severe damage; abnormal operating conditions due to failures, ruptures, collapses; destruction induced by human production, such as attacks, errors, etc.; and network expansion due to consumer demand that causes an imbalance in the supply of the product or service. Given this, there are three possible measures: resource allocation; redundancy, component reinforcement, and network topology adjustment; and organizational strategies (Liu; Song, 2020).

Finally, the resilience of critical infrastructure has been addressed from four main perspectives (Cantelmi; Di Gravio; Patriarca, 2021): technocentric, based on technological factors; organizational, due to the social dimension of infrastructure; community-based, due to the ability of communities to deal with unforeseen events, prevent disasters, and recover; and urban,

specific to cities and urban environments related to sustainability, adaptation to climate change, risk reduction, and disasters.

For UNDRR (2022), infrastructure resilience relates to the capacity for prevention, anticipation, recovery, and timely and effective adaptation of structures and their functions through a systemic approach to all sectors and activities involved. The goal is to have a transdisciplinary approach to the system of systems. To this end, UNDRR advocates for systemic resilience as a property of an infrastructure system organized in such a way as to provide critical services even in the face of endogenous and exogenous threats, even when its components are added, modified, or eliminated.

In our view, the outlook for infrastructure is that it will become increasingly connected, whether within the same sectors or across different sectors, which increases the degree of interdependence and subjects it to more complex levels of criticality, leaving it vulnerable to risks due to the cascading effect. Given this scenario, systemic resilience is a coherent and desirable goal, especially for addressing climate risks. This is because there are severe gaps in the integrated treatment of multiple risks and multiple infrastructures, which require a systemic intersectoral approach (Verschuur et al, 2024), justifying systemic resilience as a way to address the adverse consequences that occur on infrastructure systems and that subject services, people, and nature to greater vulnerabilities and damage.

## *INSTITUTIONAL FRAGMENTATION AND TERRITORIAL GOVERNANCE*

Resilience should not be adopted as a generic term applicable to assets, services, institutions, or people indiscriminately. Although it is a widely disseminated and generically reproduced definition (Monstadt; Schmidt, 2019), it is essential to pay attention to the specificities of each area of approach. In the case of infrastructure, the *Coalition for Disaster Resilient Infrastructure* (CDRI, 2025) lists eight key points to ensure its ability to cope with events resulting from climate change. These are: infrastructure risk assessment and measurement of resilience benefits; preparation for asset recovery and

reconstruction; absorption, response, and recovery in the shortest possible time; incorporation of new technologies; securing financing for resilient infrastructure through specific instruments; coordination between government agencies, infrastructure asset owners, operators, companies, and communities; and formulation of policies, governance structures, standardized technical guidelines, and financial instruments for infrastructure transition and adaptability.

However, in the face of increasing infrastructure integration, its management and governance are undergoing an intense process of fragmentation, hindering discussions, actions, and multilateral or coordinated financing. Although it is not primarily a technological problem, it is a technical problem because it involves issues arising from the different institutions and bodies responsible for decision-making. The institutionally fragmented context stems from different processes, but converges on common problems of design, use, management, and maintenance of infrastructure.

Institutional fragmentation of infrastructure occurs mainly through the concession or privatization of public assets and services, which involves coordination between public and private entities in a field that was previously considered a state monopoly and, therefore, managed by a single entity. Decentralization or the shifting of responsibilities implies changes in the management and operation of infrastructure, whose negative impacts, in several cases, have been explained by the Theory of the Normal Accident (Perrow, 1984) or by the Theory of High Reliability (Weick; Sutcliffe; Obstfeld, 1999), which seek to understand how risks occur and are handled in highly interactive complex systems in these contexts.

Internationally, this trend toward institutional fragmentation is summarized by the term New Public Management, which has been used to describe a set of initiatives aligned with neoliberal approaches to infrastructure operation and maintenance through the fragmentation of the public and private agents responsible for them (Cedergren; Johansson; Hassel, 2018). This designation seeks to contribute to the understanding of current standards in institutional, organizational, contractual, and regulatory relationships involving infrastructure assets and services, especially when responding to the impacts of climate events.

In general, events with the greatest impact, such as major disasters, tend to bring together those responsible for rapid and efficient responses in the short and medium term, even when there are no resources provided for in the planning. Minor incidents, however, require integrated actions that do not attract the same attention as major events, and therefore accumulate, causing disruption and social impacts that are proportionally greater than their technological impacts. This situation is aggravated by the overlapping of functions that occurs not only between public and private entities, but also between different levels of public entities (such as federal, state, and municipal entities), between competing private companies, and between integrated service providers (such as security, energy, communication, water, etc.).

Responsibilities are determined contractually, either shared or not, but in exceptional cases, there are impasses that need to be resolved and are often taken to court. This condition links infrastructure vulnerabilities to endogenous factors, such as the demand to control the increasing complexity of interdependencies, which amplify exogenous factors (climate change, attacks, etc.). Thus, the cascading effect of damage goes from minor disruptions in subsectors or components to the interruption of a complex chain of services. Thus, institutional fragmentation hinders a coordinated system of simultaneous and joint decisions in response to these problems, as it often operates through isolated and/or competing responsibilities.

The institutional disintegration of infrastructure control physically projects itself onto a given area, fragmenting the territory and making it more vulnerable to extreme effects or less resilient in recovering welfare, security, and development functions and services. Disruptions in the system reinforce its weaknesses and, in a context of institutional fragmentation, are amplified in a chain reaction by the fragmentation that also occurs in planning, regulation, and decision-making.

The resilience of complex systems or systems of systems depends on the proper functioning of other infrastructures (organizational, informational, computational, etc.). Interference or overshadowing of the management of these infrastructures by ins-

titutional fragmentation can compromise actions aimed at the main purpose of keeping other infrastructures operating. In a context of strong interdependence between sectors in a fragmented environment of infrastructure management and decision-making, the vulnerability of end-user infrastructure is greater.

Disintegrated data, research detached from empirical debates, and investments determined by sectoral factors reinforce this reality of institutional fragmentation. The adaptation and transition of infrastructure entails additional costs, and the conflicting priorities of institutions do not contribute to the convergence of actions. Legal uncertainty surrounding larger investments justified by uncertainties, i.e., phenomena that have not yet occurred or whose occurrence and impact cannot be measured, is also unhelpful.

Therefore, in the event of damage, micro-efficiency linked to compliance with institutional standards and protocols can be seen in contrast to macro-inefficiency in the resumption of services. In other words, isolated internal procedures are efficiently followed, but they do not provide a solution to the problem, just as organizational resilience guided by conduct and principles often fails, in practice, to achieve the resilience of complex systems, which involves a multiplicity and simultaneity of organizations and agents. Finally, the high level of trust placed in concession contracts has led to the commoditization of asset and service security in the face of regulatory changes brought about by the opening up of the infrastructure market (Cedegren et al). On several occasions, barriers to resilience (to provide robustness, redundancy, reliability, and flexibility to a given system) lie in political, institutional, informational, and cultural impasses.

The transformation of physical infrastructure assets into economic or financial assets, also derived from market logic and consistent with New Public Management, repositions infrastructure as a means of profitability, subjecting it to the instabilities of financial arrangements and increased competition through reduced investment and maximized use. Therefore, this issue needs to be understood in greater depth and through broader channels of governance, since the transformation of infrastructure into an economic and financial asset, in many cases, distances it from its function of providing universal social welfare.

Furthermore, even with fiscal adjustment agreements and public-private partnerships, the state is responsible for ensuring this well-being, which, among other things, depends on the provision of services and infrastructure. Therefore, state planning and regulation are still a reliable means of controlling and distributing services equitably in order to serve different interests. These aspects are confronted with more incisive market action (on infrastructure and land ownership); with a functional change in government authority, resources, and skills; with the expansion of market dominance over technologies, assets, and data; and with the internationalization of service providers and companies responsible for the construction and/or operation of infrastructure (Pursiainen, 2018).

This situation confirms the need for public planning to be coordinated by a governance system that responds to new infrastructure demands and old problems of inequality and segregation. It is understandable that in order to address technical networks, it will be necessary to reorganize institutional, data, research, organizational, and people networks. The demand for resilience may be centered on a comprehensive view of infrastructure across multiple sectors and of varying dimensions, understood from the perspective of the territory, which is, after all, where the main impacts occur and where people and nature are located.

The idea of territorial governance is fundamental for coordinating different agents and organizations and contributing to an integrated view of technological diversity, the variety of actors, the different forms of asset and service management, and responses to the impacts, damage, and vulnerabilities caused by, among other sources, climate change. Territorial governance would be governance supported by a public planning system that brings together organized society, public management, the market, academia, and multilateral organizations under a territorial authority. Therefore, an authority that has the responsibility of providing governance of the territory through infrastructure, considering it an important strategy for the State to guarantee well-being.

Increasing not only resilience, but also the quality and continuity of infrastructure, is linked to political governance that is

supportive and proactive. It can be understood as network governance (through recognition of the interdependencies between the agents involved), seeking to avoid hierarchical governance (command and control), market governance (competitiveness), or community governance (strictly private) (Knodt; Fraune; Engel, 2022). Establishing network governance means recognizing the centrality of institutionality, common interest, and territorial aspects based on research, proposals, and monitoring of infrastructure with the institutional capacity to promote innovation and adaptation to existing systems. It also means comprehending, in a comprehensive manner and through decentralized actions, the structure of the most critical services and infrastructures, repositioning them in the common interest.

## *CONCLUDING REMARKS: WHY ON THE TERRITORY?*

In public policy, territory has served as a means for sectoral policies; as an end for national plans; as a place of regulation; and as a strategy for disputing rights (Silva, 2013). In infrastructure provision, it is often considered as land liability; natural barrier; repository of demand to be exploited (natural resources, people, products); or technical constraint for routing networks and systems. What is envisaged for infrastructure planning is the territory as the basis for governance and a central element of decision-making to overcome the "decision dilemma." After all, the territory is the place where infrastructure components are integrated; where differences and inequalities emerge; where infrastructure has an impact; and where physical, institutional, and social damage from multiple risks occurs and spreads.

The claim that territory should be the basis for infrastructure governance seeks to avoid selective coordination of actions (Macrorie; Marvin, 2019), which favors specific sectors and classes. The aim of a territorial authority based on infrastructure is to break away from privileged, exclusively competitive location decisions and move towards the effective integration of institutions and solutions.

With infrastructure as the focus, the contemporary challenge lies in addressing the limited capacity of concessionaires and local authorities to manage conflicts and uncertain damage to infrastructure; addressing the fragility of the federal pact in the management and investment of shared infrastructure; restoring a coordinated vision for conurbated and/or regionalized areas, such as metropolitan regions and population arrangements; repositioning the role of the State as the main entity responsible for designing public services of common interest, welfare, security, and development, especially critical infrastructure; integrating infrastructure with socioeconomic development, land use, environmental conservation, and poverty alleviation; and overcoming technical paradigms and social values through the permanent adaptability of infrastructure in the face of present uncertainties.

The goal is to avoid the interdependence paradox (Monstadt; Schmidt, 2019). This paradox occurs due to the divergence between the interdependence of infrastructures and institutional fragmentation. The complexities of integration and functional dependencies between infrastructures and services, as well as the potential increase in cascading effects, create vulnerabilities and risks. However, their impacts are addressed by incremental solutions (when they should be addressed by structural solutions), given institutional fragmentation, with difficulties in stopping the spread of damage, whether between sectors or across territorial borders. This paradox, according to the authors, consists of the breakdown of infrastructure into market subdomains, managed independently by sector and territory, at a time of widespread connectivity.

In this sense, territorial governance linked to infrastructure can coordinate and reconcile agendas; address conflicts between infrastructure and between infrastructure, society, and the environment; prioritize investments; address uncertainties, risks, resilience, and adaptability in infrastructure design; control and make data available; encourage research; monitor and evaluate infrastructure; and innovate in its design. It can also, based on a review of what infrastructure planning may entail, from a territorial perspective, helps to integrate it into the reality of the Brazilian urbanization process.

## *BIBLIOGRAPHIC REFERENCES*


ACKOFF, R. L. Towards a system of systems concepts. **Management Science**, vol. 17, p. 661-671, 1971.

BRASIL. Decreto n. 9.573 de 22 de novembro de 2018.

BRUNEAU, M.; CHANG, S. E.; EGUCHI, R. T.; LEE, G. C.; O'ROURKE, T. D. REINHORN, A. M.; SHINOZUKA, M.; TIERNEY, K.; WALLACE, W. A.; VON WINTERFELDT, D. A framework to quantitatively assess and enhance the seismic resilience of communities. **Earthquake Spectra**, 19(4), p. 733–752, 2003.

CANTELMI, Raffaele; DI GRAVIO, Giulio; PATRIARCA, Riccardo. Reviewing qualitative research approaches in the context of critical infrastructure resilience. **Environment Systems and Decisions**, v. 41, p. 341–376, 2021.

CDRI (Coalition for Disaster Resilient Infrastructure). **Executive sumary. Global Infrastructure Resilience 2025. Capturing the resilience dividend**. New Delhi, India: CDRI. 2025.

CEDERGREN, Alexander; JOHANSSON, Jonas; HASSEL, Henrik. Challenges to critical infrastructure resilience in an institutionally fragmented setting. **Safety Science**, v. 110, p. 51–58, 2018.

DVOŘÁK, Zdeněk; SVENTEKOVÁ, Eva; ŘEHÁK, David; CEKEREVAC, Zoran. Assessment of Critical Infrastructure Elements in Transport. **Procedia Engineering**, v. 187, p. 548–555, 2017.

FEKETE, Alexander. Critical infrastructure and flood resilience: Cascading effects beyond water. **WIREs Water**, v. 6, n. 5, p. e1370, 2019.

FORZIERI, Giovanni; BIANCHI, Alessandra; SILVA, Filipe Batista e; HERRERA, Mario A. Marin; LEBLOIS, Antoine; LAVALLE, Carlo; AERTS, Jeroen C. J. H.; FEYEN, Luc. Escalating impacts of climate extremes on critical infrastructures in Europe. **Global Environmental Change**, v. 48, p. 97–107, 2018.

HARAŠTA, Jakub. Legally critical: Defining critical infrastructure in an interconnected world. **International Journal of Critical Infrastructure Protection**, v. 21, p. 47–56, 2018.

HICKFORD, Adrian J.; BLAINEY, Simon P.; HORTELANO, Alejandro Ortega; PANT, Raghav. Resilience engineering: theory and practice in interdependent infrastructure systems. **Environment Systems and Decisions**, v. 38, p. 278–291, 2018.

HUDDLESTON, Pippa; SMITH, Tim; WHITE, Iain; ELRICK-BARR, Carmen. Adapting critical infrastructure to climate change: A scoping review. **Environmental Science and Policy**, v. 135, p. 67–76, 2022.

KNODT, Michèle; FRAUNE, Cornelia; ENGEL, Alice. Local governance of critical infrastructure resilience: Types of coordination in German cities. **Journal of Contingencies and Crisis Management**, v. 30, p. 307–316, 2022.

LIU, Wei; SONG, Zhaoyang. Review of studies on the resilience of urban critical infrastructure networks. **Reliability Engineering and System Safety**, 1993, p. 1-16, 2020.

MACRORIE, Rachel; MARVIN, Simon. Bifurcated urban integration: The selective dis- and re-assembly of infrastructures. **Urban Studies**, v. 56(11), p. 2207-2224, 2019.

MONSTADT, Jochen; SCHMIDT, Martin. Urban resilience in the making? The governance of critical infrastructures in German cities**. Urban Studies**, v. 56(11), p. 2353-2371, 2019.

PERROW, C. **Normal Accidents: Living with High-Risk Technologies**. New York: Basic Books, 1984.

PURSIAINEN, Christer. Critical infrastructure resilience: A Nordic model in the making? **International Journal of Disaster Risk Reduction**, v. 27, p. 632–641, 2018.

REHAK, David; SENOVSKY, Pavel; Hromada, Martin; LOVECEK, Tomas; NOVOTNT, Petr. Cascading Impact Assessment in a Critical Infrastructure System. **International Journal of Critical Infrastructure Protection**, v. 22, p. 125–138, 2018.

RINALDI, Steven M.; PEERENBOOM, James P.; KELLY, Terrence K. Identifying, Understanding, and Analyzing Critical Infrastructure Interdependencies. **IEEE Control Systems Magazine**, v. 21, n. 6, p. 11–25, 2001.

SHAKOU, Louisa Marie; WYBO, Jean-Luc; RENIERS, Genserik; BOUSTRAS, Georgios. Developing an innovative framework for enhancing the resilience of critical infrastructure to climate change. **Safety Science**, v. 118, p. 364–378, 2019.

SILVA, Sandro Pereira. Considerações analíticas e operacionais sobre a abordagem territorial em políticas públicas. In: IPEA. **Brasil em desenvolvimento 2013: Estado, planejamento e políticas públicas** (editores: Rogério Boueri, Marco Aurélio Costa). Brasília: Ipea, 2013.

UNDRR (UN Office for Disaster Risk Reduction). **Making critical infrastructure resiliente. Ensuring continuity or service. Policy and regulations in Europe and Central Asia**. Belgium: UNDRR, 2020.

UNDRR (UN Office for Disaster Risk Reduction). **Principios para uma infraestrutura resiliente**. Genebra: UNDRR, 2022.

VAL, Dimitri V.; YURCHENKO, Daniil; NOGAL, Maria; O'CONNOR; Alan. Climate Change-Related Risks and Adaptation of Interdependent Infrastructure Systems. *In:* **Climate Adaptation Engineering**. [s.l.]: Elsevier, 2019. cap. 7, p. 207-242.

VERSCHUUR, Jasper et al. Quantifying climate risks to infrastructure systems: A comparative review of developments across infrastructure sectors. **PLOS Climate**, v. 3, n. 4, e0000331, 2024.

WEICK, K. E.; SUTCLIFFE, K. M., OBSTFELD, D. Organizing for high reliability: processes of collective mindfulness. **Res. Organizational Behav**, 21, p. 81–123, 1999.

This study was financed, in part, by the São Paulo Research Foundation (FAPESP), Brasil. Process Number #2022/01583-9.
This work was supported by the National Council for Scientific and Technological Development (CNPq) of Brazi l— Grant Nº. 307498/2023-9.

# PARTE I

## CONCEITOS APLICADOS PARA A TRANSIÇÃO: INFRAESTRUTURA E OS ASPECTOS CLIMÁTICOS

# PART I

## CONCEPTS APPLIED TO THE TRANSITION: INFRASTRUCTURE AND CLIMATE ASPECTS

1

# RESILIÊNCIA CLIMÁTICA NAS INFRAESTRUTURAS BRASILEIRAS E A AGENDA DE ADAPTAÇÃO DO PLANO CLIMA

ÉRICO ROCHA,
INAMARA MÉLO
E THIAGO OLANTE CASAGRANDE

## RESUMO

As perdas de ativos e as interrupções de serviços provocadas por desastres e riscos climáticos comprometem significativamente os investimentos em infraestrutura, estimados em mais de US$ 700 bilhões anuais globalmente e mais de R$ 421 bilhões entre 2014 e 2023 no Brasil. As infraestruturas apresentam distintos graus de exposição e vulnerabilidade – apesar de muitas vezes compartilharem o mesmo território, as infraestruturas são afetadas de formas e graus diferentes pelos impactos climáticos, necessitando de abordagens específicas para incremento de sua resiliência. O *gap* de investimentos em infraestrutura no Brasil torna esse incremento ainda mais desafiador. O Plano Clima será o principal norteador das políticas climáticas brasileiras até 2035 e, por esse motivo é um dos temas centrais deste artigo, com o objetivo de relacionar as vulnerabilidades climáticas da infraestrutura brasileira com os instrumentos brasileiros da governança climática. Foi realizada pesquisa bibliográfica sobre o panorama dos impactos climáticos na infraestrutura nacional e internacional, fazendo a conexão com os principais instrumentos de planejamento do setor: a Estratégia Nacional de Adaptação (ENA) e os Planos Setoriais de Adaptação (PSAs).

### Palavras-chave

Infraestrutura resiliente; Risco climático; Planejamento.

# 1. INTRODUÇÃO

As mudanças climáticas globais configuram um desafio premente para o desenvolvimento sustentável, especialmente em países de grande extensão territorial e diversidade socioambiental, como o Brasil. Entre os setores mais sensíveis aos impactos climáticos estão as infraestruturas, que formam a espinha dorsal das atividades econômicas e do bem-estar social. Eventos climáticos extremos, como intensificação de chuvas, secas persistentes, ondas de calor e elevação do nível do mar, têm afetado a integridade e a operação dessas infraestruturas, demandando ajustes institucionais e técnicos orientados a adaptação e resiliência (IPCC, 2022; BRASIL, 2025).

Infraestruturas modernas são particularmente vulneráveis a uma série de ameaças climáticas, como cheias, incêndios florestais, ciclones e variações extremas de temperatura. A magnitude dos impactos climáticos pode ser expressa pelos danos diretos, perdas de receita e interrupção dos serviços críticos (Verschuur et al., 2024).

> "*Perdas de ativos e interrupções de serviços associadas a desastres e riscos climáticos corroem uma proporção significativa dos novos investimentos de capital necessários para os países lidarem com seus déficits de infraestrutura. Considerando uma perda anual média estimada em mais de US$ 700 bilhões em infraestrutura e edifícios, novos investimentos em infraestrutura sem incremento na resiliência são análogos a despejar água em uma cesta de bambu.*" (CDRI, 2023)

Por ter uma economia fortemente baseada em recursos naturais, com grande parcela da população vivendo em áreas de risco e zonas costeiras, o Brasil figura entre os países mais vulneráveis às mudanças climáticas. O Atlas Digital de Desastres do Brasil mostra que, entre 2015 e 2024, 84,5% dos 5.570 municípios brasileiros foram afetados, causando danos de mais de R$ 455,5 bilhões. Nesse período, 1,67 milhão de moradias foram danificadas, 293 mil moradias foram destruídas e 324,6 milhões de pessoas foram afetadas. Desse total, 5,9 milhões de pessoas foram diretamente atingidas, excluindo-se aquelas prejudicadas pelo desabastecimento de bens e serviços. Já

a plataforma AdaptaBrasil, do Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI), identificou pouco mais da metade dos 5.570 municípios brasileiros com índice de vulnerabilidade alto ou muito alto a desastres geo-hidrológicos, como enchentes, inundações e deslizamentos de terra, conforme mostra o mapa abaixo. Ainda de acordo com a plataforma, 48% dos municípios do país (2.263) têm capacidade baixa ou muito baixa diante de eventos de secas. (BRASIL, 2025).

Este capítulo tem a proposta de trazer um panorama ambiental dos riscos climáticos que incidem sobre as infraestruturas brasileiras, considerando as especificidades regionais, a diversidade dos sistemas infraestruturais e a interligação entre eles. Além disso, alinhamos a discussão com as políticas públicas que servirão de guia para a resiliência climática da infraestrutura brasileira nos próximos anos, o Plano Clima, — em especial, — a Estratégia Nacional de Adaptação (ENA) e os Planos Setoriais de Adaptação (PSAs) relativos aos setores de Energia, Cidades, Transporte, Recursos Hídricos e Redução e Gestão de Riscos e Desastres, que estão nas últimas etapas para finalização, com a consulta pública já encerrada.

O objetivo central é fornecer aos formuladores de políticas, gestores públicos, pesquisadores e demais atores interessados um diagnóstico embasado e propositivo para fortalecer a resiliência das infraestruturas brasileiras às mudanças climáticas, injetando conhecimento atual e diretrizes setoriais específicas no debate.

## 2. PANORAMA DAS INFRAESTRUTURAS NO BRASIL E SUA VULNERABILIDADE CLIMÁTICA

O Brasil detém uma complexa rede de infraestruturas, com grande diversidade funcional e territorial. A matriz energética ainda depende amplamente de fontes hidrelétricas (cerca de 60% da capacidade instalada), mas vem avançando na incorporação de energias renováveis alternativas. O setor de transporte cobre rodovias, ferrovias, hidrovias, portos e aeroportos, instrumento fundamental para o comércio interno e internacional. O saneamento básico, embora com progressos recentes, continua deficitário em grande parte do território, com impacto direto na saúde pública e qualidade ambiental das cidades.

Segundo a Associação Brasileira da Infraestrutura e Indústrias de Base (Abdib), o ano de 2024 apresentou o maior investimento em infraestrutura da série histórica desde 2010, com destaque para o maior investimento privado da série, conforme gráfico da Figura 1.

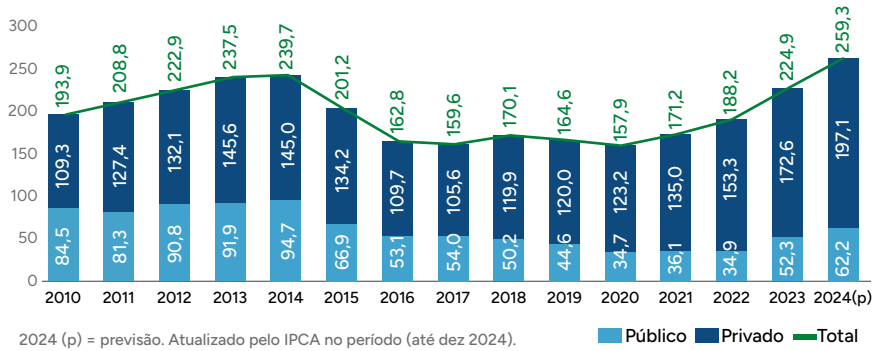



**Figura 1:** Investimento Público e Privado na Infraestrutura (em R$ bilhões) – Em valores constantes de 2024 *(ABDIB, 2024)*

O investimento recorde, porém, ainda está muito aquém do investimento necessário em infraestrutura, gerando um déficit substancial em especial no setor de transporte/logística. A Figura 2 apresenta a estimativa do *gap* de investimentos por setor.

| Setor | Investimento Realizado 2024 (p) | | Investimento Necessário | | GAP Investimentos | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | R$ Bilhões | em % PIB | R$ Bilhões | em % PIB | R$ Bilhões | em % PIB |
| Transportes / Logística | 63,0 | 0,54 | 264,4 | 2,26 | 201,4 | 1,72 |
| Energia Elétrica | 119,3 | 1,02 | 98,3 | 0,84 | Não há | Não há |
| Telecomunicações | 43,0 | 0,37 | 88,9 | 0,76 | 45,9 | 0,39 |
| Saneamento | 34,0 | 0,29 | 52,7 | 0,45 | 18,7 | 0,16 |
| **Total** | **259,3** | **2,22** | **503,4** | **4,31** | **266,0** | **2,27** |

**Figura 2:** Realidade e Necessidade de Investimentos em Infraestrutura por Ano (nos próximos dez anos) R$ bilhões correntes *(ABDIB, 2024)*

Essas infraestruturas estão distribuídas em biomas distintos e em contextos urbanos, periurbanos e rurais, que apresentam diferentes graus e tipos de exposição e vulnerabilidade climática.

Segundo Pacharke *et al.* (2021), a vulnerabilidade das infraestruturas a riscos climáticos refere-se não apenas à exposição física, mas também à capacidade de resistência, absorção e recuperação após eventos adversos, muitas vezes limitada pela fragilidade técnica, gestão inadequada e recursos insuficientes.

Regiões urbanas, especialmente as metrópoles da Região Sudeste, Nordeste e Sul, enfrentam frequentes enchentes urbanas e deslizamentos, que danificam redes viárias, drenagem e sistemas elétricos (BRASIL, 2025). Já o Nordeste concentra riscos significativos de seca prolongada, afetando as infraestruturas hídricas para abastecimento e irrigação. A Região Norte, com alta dependência de hidrelétricas acopladas ao bioma amazônico, está particularmente vulnerável ao desmatamento e à alteração do ciclo hidrológico (IPCC, 2022).

Crises recentes evidenciam essas vulnerabilidades. Em 2021, a crise hídrica nacional afetou o sistema energético, expondo a fragilidade da matriz hidrelétrica frente a eventos extremos. No Sul do país, enchentes causaram interrupções importantes no transporte rodoviário e ferroviário, repercutindo negativamente na cadeia logística. Esses fatos ilustram a necessidade urgente de adaptação e planejamento estratégico (BRASIL, 2025).

Diversos tipos de infraestrutura apresentam distintos graus de exposição e vulnerabilidade a ameaças climáticas dominantes. Rodovias e ferrovias são especialmente sensíveis a inundações; portos e aeroportos destacam-se pela exposição ao aumento do nível do mar, tempestades e ventos extremos; enquanto sistemas hídricos sofrem com secas prolongadas. Eventos recentes demonstram como setores podem ter impactos diferenciados e recuperações em prazos variados, com interdependências críticas entre os serviços (Verschuur et al., 2024).

Na Figura 3, traduzida de Verschuur *et al.* (2024), os autores mapearam as diferenças nos impactos e vulnerabilidades das infraestruturas em escala global, demonstrando que, apesar das infraestruturas muitas vezes compartilharem o mesmo território, elas são afetadas de formas e graus diferentes pelos impactos climáticos, necessitando de abordagens específicas para incremento de sua resiliência.

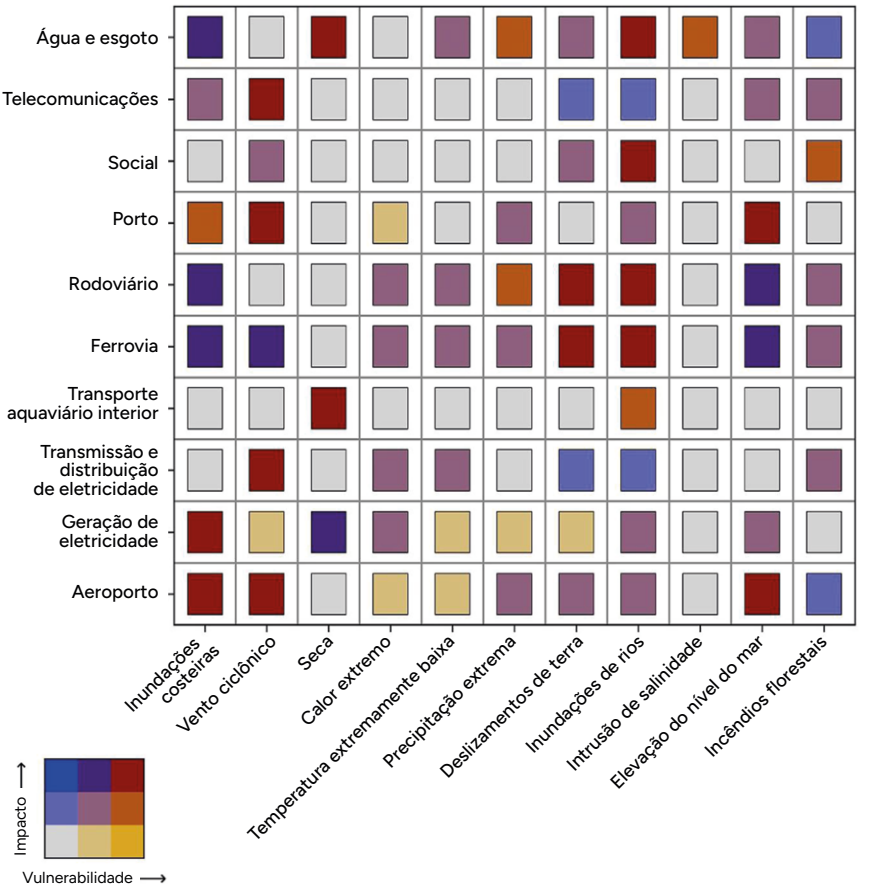



**Figura 3:** Gráfico bivariado mostrando a vulnerabilidade e os impactos de combinações de riscos climáticos e tipos de infraestrutura.

Para cada combinação de risco climático e infraestrutura, a vulnerabilidade da infraestrutura a esse risco é caracterizada como baixa, média ou alta (de claro a escuro). Da mesma forma, o impacto de interrupções na infraestrutura em caso de ocorrência de um risco climático é caracterizado como baixo, médio ou alto (de claro a escuro). Em conjunto, isso cria um sistema de classificação de risco com nove tipos diferentes de combinações, conforme indicado pelas cores. Essa caracterização é baseada no julgamento especializado dos autores (Verschuur *et al.*, 2024).

## 3. RISCOS CLIMÁTICOS E RESILIÊNCIA APLICADA ÀS INFRAESTRUTURAS

O risco climático resulta da interação entre a exposição a eventos climáticos adversos, a vulnerabilidade dos sistemas afetados e a capacidade de adaptação e mitigação a esses estímulos (IPCC, 2022). A vulnerabilidade inclui aspectos físicos (estado do equipamento, localização), institucionais (governança, orçamento) e sociais (populações afetadas), enquanto a adaptação envolve medidas que aumentam a capacidade do sistema se preparar, resistir, recuperar e melhorar frente às ameaças (Pacharke *et al.*, 2021).

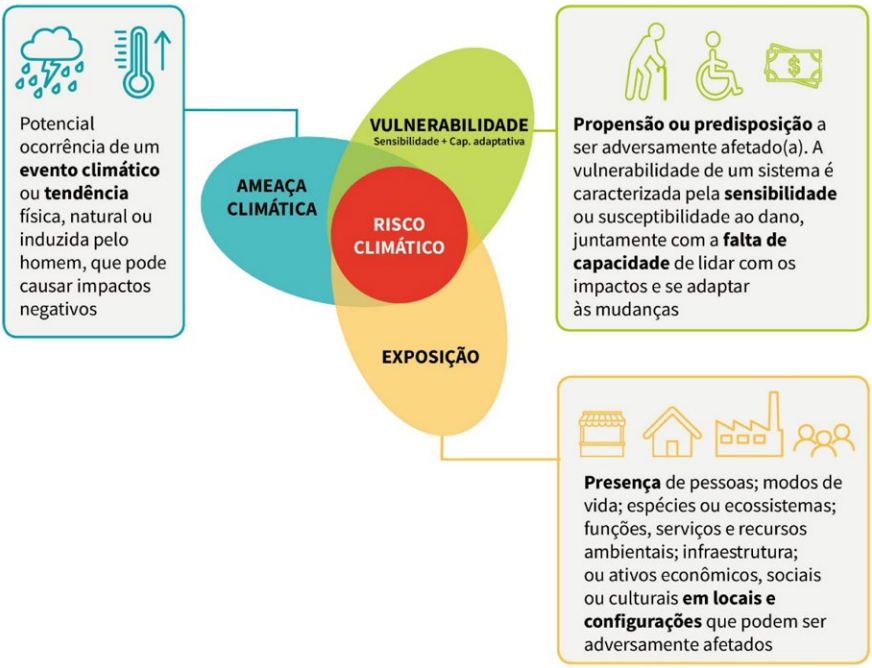



**Figura 4:** A análise de risco considera a composição de informações de ameaça climática, exposição e vulnerabilidade *(BRASIL, 2025, apud IPCC, 2022)*

A resiliência climática é o conceito-chave para a abordagem das infraestruturas, definida como a habilidade dos sistemas em manter seu funcionamento durante e após choques climáticos, limitando perdas e restabelecendo rapidamente a operação plena.

Conforme Barnett e O'Neill (2010), é fundamental evitar "má-adaptação", que gera novos riscos ou amplifica vulnerabilidades existentes.

Além disso, a análise da interdependência das infraestruturas é crucial. Muir-Wood (2010) evidencia que falhas em uma infraestrutura, como o sistema energético, podem desencadear falhas em transportes, abastecimento de água e telecomunicações, provocando efeitos cascata graves.

## 3.1. Diagnóstico do quadro ambiental dos riscos climáticos nas infraestruturas brasileiras

O Brasil exibe um quadro heterogêneo quanto à vulnerabilidade climática. Regiões metropolitanas apresentam elevado risco, devido à urbanização acelerada sem planejamento ambiental adequado, aumento das ilhas de calor urbano e impermeabilização do solo, que agrava enchentes (BRASIL, 2025). As regiões semiáridas enfrentam desafios pela disponibilidade hídrica reduzida e pela alta irregularidade pluviométrica.

Mapas e monitoramentos recentes apontam para o crescimento da frequência e intensidade de eventos extremos, como tempestades intensas, ondas de calor, secas e inundações costeiras (IPCC, 2022). A elevação do nível do mar ameaça infraestruturas portuárias, zonas urbanas costeiras e sistemas de saneamento (BRASIL, 2025). Os impactos são amplificados por práticas de uso do solo equivocadas, desmatamento e degradação ambiental, que reduzem a capacidade natural de contenção de enchentes e regeneração hídrica, além de agravar os padrões de vulnerabilidade social.

A interdependência entre infraestrutura reforça a complexidade: falhas nas redes de energia afetam drenagem e abastecimento; danos em transportes dificultam respostas emergenciais em desastres; perda em sistemas de saneamento impacta saúde pública, criando um círculo vicioso de fragilidades e riscos crescentes (Muir-Wood, 2010; Pacharke et al., 2021).

As Figuras 5 e 6 fazem um resgate histórico dos principais eventos climáticos extremos relacionados a mudanças severas no padrão de chuvas, bem como de secas e queimadas, desde 2010.

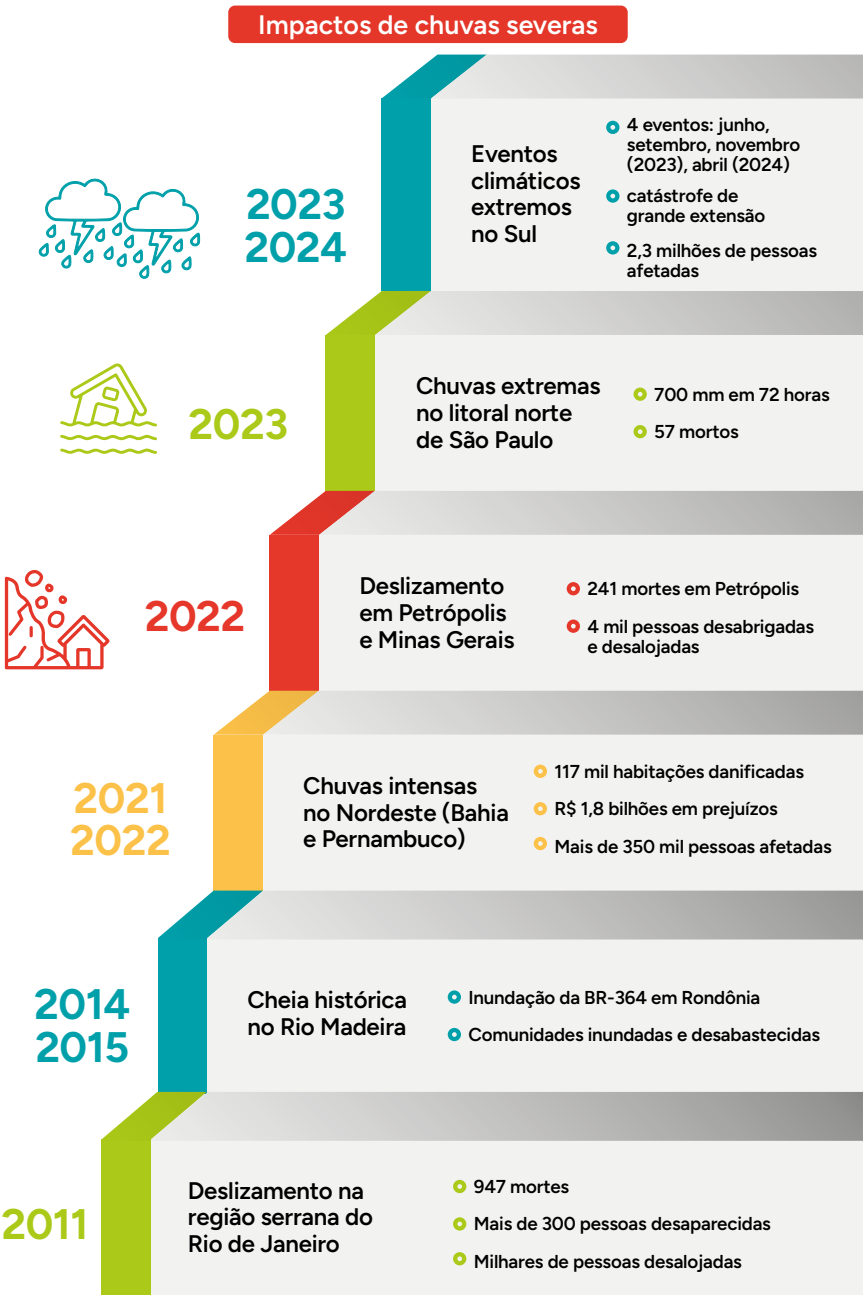
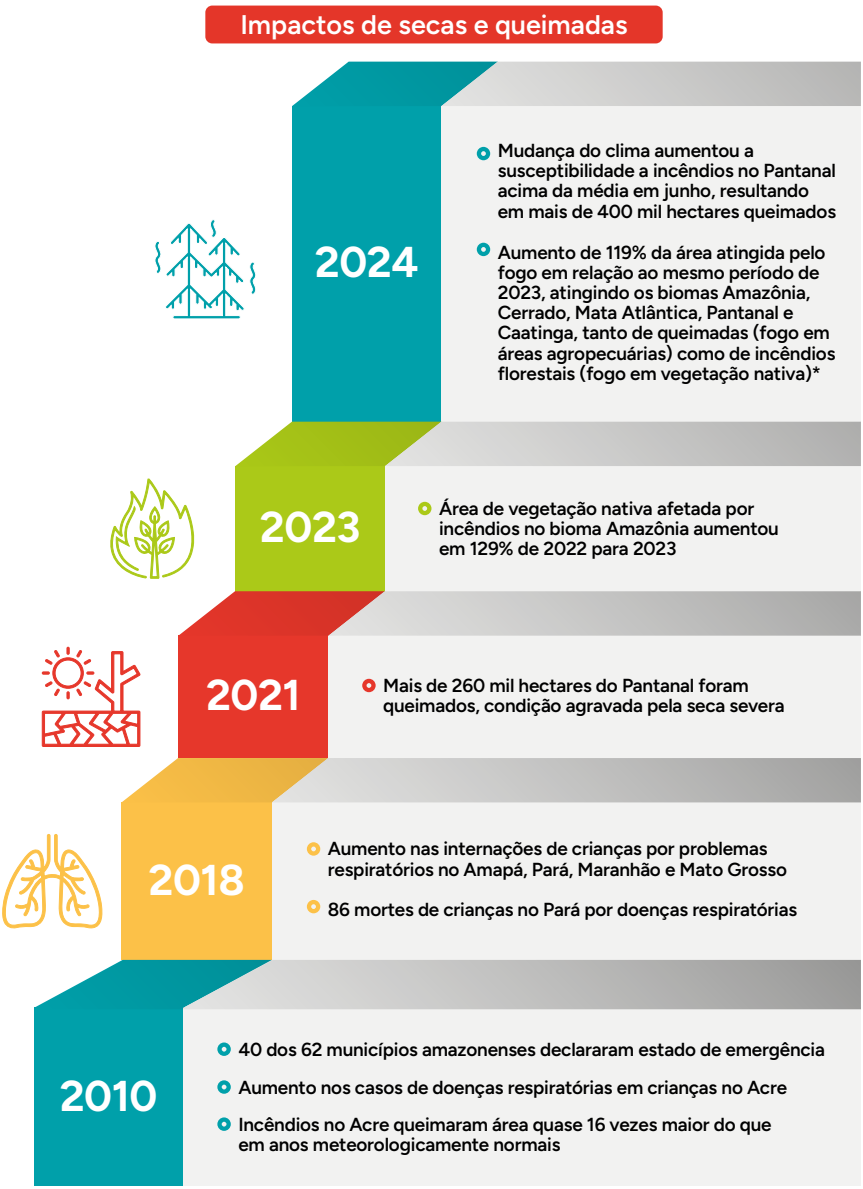



**Figura 5:** Linha do tempo sobre impactos de chuvas severas no Brasil entre 2011 e 2024 *(BRASIL, 2025, apud, Atlas Digital de Desastres no Brasil - Brasil, 2025)*




*Dados relativos ao primeiro semestre de 2023 e 2024

**Figura 6:** Impactos de secas e incêndios no Brasil entre 2010 e 2024
*(BRASIL, 2025, apud, SMITH et al., 2015; PINHO, 2016; ALENCAR et al., 2023 e BARNES, SANTOS, LIBONATI et al., 2024)*

# 4. PLANO CLIMA E A ADAPTAÇÃO DA INFRAESTRUTURA

A governança climática brasileira tem como principal política pública a Política Nacional sobre Mudança do Clima, tendo como um de seus principais instrumentos o Plano Nacional sobre Mudança do Clima, conhecido como Plano Clima. A estrutura do Plano Clima é baseada nas vertentes de mitigação e adaptação, contendo Estratégias e Planos Setoriais que são detalhados na sequência.

## 4.1. Estrutura do Plano Clima

O Plano Clima será o maior norteador das políticas públicas para o enfrentamento da mudança do clima no Brasil. Com horizonte até 2035, o Plano Clima terá dos pilares. O primeiro é a Estratégia Nacional de Mitigação, para reduzir as emissões líquidas de gases de efeito estufa, cuja alta concentração na atmosfera provoca o aquecimento global. O segundo é a Estratégia Nacional de Adaptação, para diminuir a vulnerabilidade de cidades, setores, populações e ambientes naturais à mudança do clima e garantir melhores condições de o país enfrentar os eventos climáticos extremos. Os componentes de mitigação e adaptação também terão planos setoriais e temáticos: são sete para mitigação e dezesseis para adaptação. O Plano Clima traz, ainda, Estratégias Transversais para a Ação Climática, que definirão meios de implementação (como financiamento, governança e capacitação) e medidas para a transição justa, entre outros pontos. A Figura 7 representa o resumo da estrutura do Plano Clima 2024-2035.

**Figura 7:** Estrutura do Plano Clima

## 4.2. Estratégia Nacional de Adaptação (ENA) e os Planos Setoriais de Adaptação (PSAs) para as infraestruturas

A Estratégia Nacional de Adaptação (BRASIL,2025) estabelece diretrizes para o delineamento e implementação de ações de adaptação nos **níveis federal, estadual e municipal**:

> 1. *promoção do desenvolvimento sustentável nas suas múltiplas dimensões, considerando setores e temas estratégicos para o país, tendo em vista a redução de desigualdades, a equidade e a transição justa;*
>
> 2. *promoção da justiça climática com base em suas dimensões de gênero, raça, etnia, idade, classe social, origem geográfica e demais fatores que influenciam a vulnerabilidade;*
>
> 3. *promoção da proteção, conservação e preservação ambiental, orientadas pelos princípios da precaução e prevenção;*

4. *governança multinível e transversal, tendo em vista a coerência, sinergia e complementaridade entre estratégias, considerando as especificidades territoriais;*

5. *promoção da transparência e dos processos participativos com a sociedade, em todo o ciclo iterativo da adaptação;*

6. *integração da adaptação em políticas, programas e projetos que possam ser afetados pela mudança do clima, contemplando iniciativas estruturantes e incluindo a perspectiva de longo prazo;*

7. *fortalecimento de capacidades institucionais nos diferentes níveis governamentais, incluindo aquelas necessárias para o acesso a fontes de financiamento e meios de implementação para medidas de adaptação apropriadas a cada contexto;*

8. *promoção de cobenefícios entre a adaptação e a mitigação das emissões de GEE;*

9. *adoção do melhor conhecimento disponível, com base na ciência, nas boas práticas setoriais e da sociedade, no conhecimento tradicional e demais fontes consideradas apropriadas;*

10. *integração de ações incrementais e transformacionais, baseada na compreensão de riscos relacionados ao clima e seus múltiplos fatores condicionantes, com diferentes horizontes temporais e escalas de execução;*

11. *promoção da sensibilização e da conscientização pública sobre a mudança do clima, suas causas, consequências e abordagens para redução dos riscos;*

12. *adoção da abordagem de Adaptação baseada em Ecossistemas (AbE), reconhecendo seu potencial de redução de riscos climáticos e vulnerabilidades de forma sistêmica, flexível, socialmente justa e custo-efetiva, e benefícios para os esforços de mitigação, simultaneamente;*

13. *garantia da flexibilidade e adaptabilidade das estratégias, com revisões do Plano e mudanças de contexto, a fim de incorporar atualizações de informações e conhecimentos gerados, assim como lições aprendidas.*

Com a publicação dos Planos Setoriais de Adaptação (PSAs), que deve sair em breve, os setores estratégicos terão orientações específicas, contribuindo para maior detalhamento e operacionalização da ENA.

## 5. DESAFIOS E OPORTUNIDADES PARA A GESTÃO DE RISCOS CLIMÁTICOS NAS INFRAESTRUTURAS

Os desafios para implementar as diretrizes da ENA e dos PSAs concentram-se na dificuldade de mobilização de recursos financeiros substanciais, na necessidade de capacitação técnica descentralizada, na insuficiência de dados meteorológicos e climáticos finos para o planejamento local e na complexa governança institucional brasileira, marcada por sobreposição de competências e baixa articulação entre os entes federativos (Pacharke et al., 2021; BRASIL, 2025).

Outro desafio importante é a resistência cultural e institucional à mudança, que pode retardar a incorporação de práticas sustentáveis e inovadoras. No entanto, a crise climática também abre oportunidade para modernização tecnológica, como o uso de satélites de alta resolução, sensores IoT (Internet das Coisas) para monitoramento contínuo, e inteligência artificial para previsão e planejamento (Kumar et al., 2021).

A introdução de infraestrutura verde, com soluções baseadas na natureza (SbN), oferece benefícios múltiplos, desde a regulação do ciclo hidrológico até o aumento da biodiversidade urbana e co-benefícios sociais, configurando-se como uma abordagem estratégica e custo-efetiva (BRASIL, 2025b).

Além disso, a construção de capacidades locais, o fortalecimento da governança participativa e a transparência são condições essenciais para a sustentabilidade das ações adaptativas ao longo do tempo.

Dos 16 Planos Setoriais de Adaptação, conforme detalhado na Figura 7, foram selecionados os que têm maior adesão com a infraestrutura, para resumo dos principais riscos destacados e das ações previstas para adaptação: Energia, Cidades, Transporte e Recursos Hídricos.

## 5.1 Setor Energia

Os riscos prioritários elencados no Plano Setorial de Energia estão resumidos na Figura 8, fazendo a relação do risco com as principais ameaças climáticas causadoras

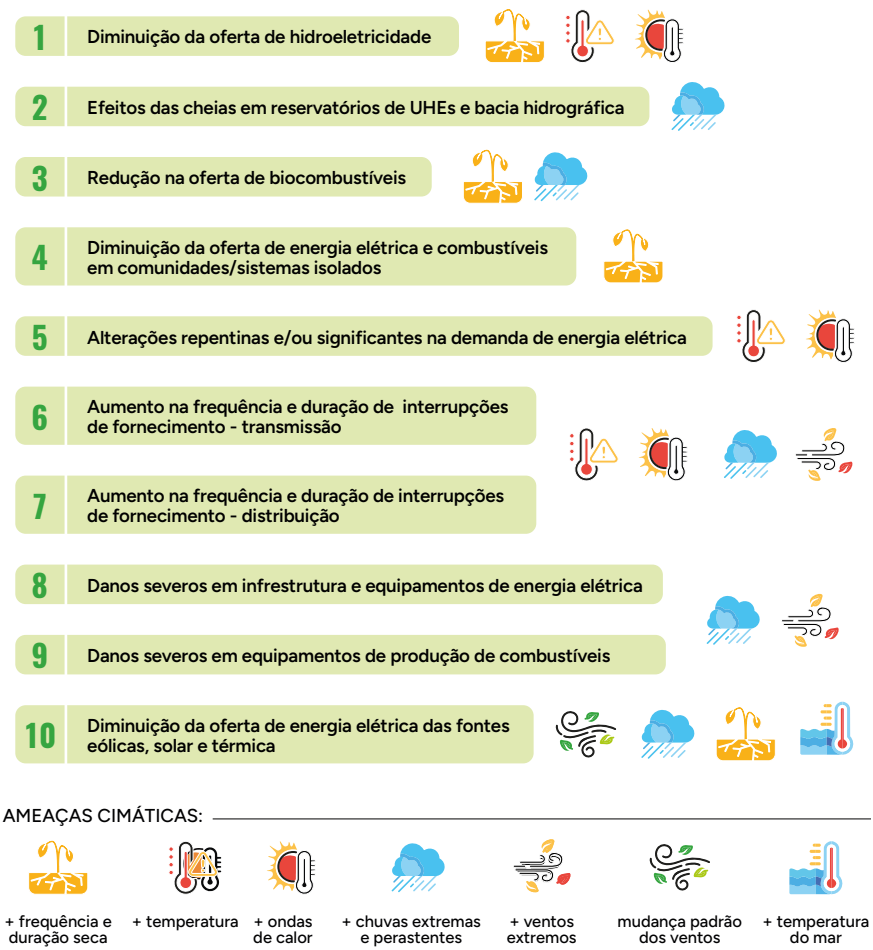



**Figura 8:** Riscos prioritários do setor de energia, associados às ameaças climáticas. *(BRASIL, 2025a)*

O Plano Setorial de Adaptação para o setor de Energia apresenta três objetivos setoriais, a serem alcançados por meio de um conjunto de 16 metas e 38 ações de curto, médio e longo prazo.

Esses objetivos tratam de: I - garantir a oferta e o acesso de energia elétrica frente às ameaças climáticas, promovendo o combate à pobreza energética; II - assegurar a oferta de combustíveis, em especial os biocombustíveis e os combustíveis de baixa intensidade de carbono, frente às ameaças climáticas; e, por fim, III- implementar e fortalecer a resiliência da infraestrutura no setor de energia.

Entre as medidas, o plano orienta o investimento em fontes renováveis alternativas (solar, eólica, biomassa) e em tecnologias de armazenamento energético, como baterias e hidrogênio verde, para assegurar continuidade da oferta em situações adversas. Vale frisar que tais ações também estão alinhadas com as ações definidas no Plano Setorial de Energia de Mitigação, que busca apresentar ações prioritárias para a redução das emissões de gases de efeito estufa do setor, em especial no que tange à geração de energia.

O Plano prevê, ainda, a modernização das redes de transmissão e distribuição, contemplando a incorporação de sistemas inteligentes (*smart grids*) para monitoramento em tempo real e recuperação rápida de falhas. Esses avanços visam ampliar a resiliência e diminuir o tempo de indisponibilidade do sistema durante eventos climáticos (BRASIL, 2025a).

## 5.2 SETOR CIDADES

Ressaltando que os riscos climáticos se apresentam de forma desigual nos bairros/territórios dos municípios e regiões, o Plano Setorial de Cidades aponta um risco principal diante do clima em mudança: o risco de fragilização do direito à cidade e de redução da qualidade de vida urbana de todas as pessoas, especialmente as mais vulnerabilizadas. Esse risco é detalhado por setores determinantes da vida urbana e do direito à cidade, de maneira a facilitar o delineamento de ações por áreas técnicas específicas. São eles:

1. Risco de aumento da precariedade e inadequação habitacional;
2. Risco de redução da qualidade do serviço e do acesso ao saneamento básico;
3. Risco de redução da qualidade dos serviços de transporte e do acesso à mobilidade urbana.

O Plano é estruturado em 3 objetivos setoriais, 8 metas e 19 ações voltados a aumentar a resiliência das cidades em termos de informação, conhecimento, planejamento, gestão, governança, infraestrutura e serviços, buscando um modelo sustentável de desenvolvimento urbano e priorizando territórios vulnerabilizados. Dessa maneira, destaca o papel do planejamento territorial integrado com enfoque na adaptação climática, recomendando o fortalecimento da infraestrutura verde urbana (parques, áreas permeáveis, corredores ecológicos) para mitigar enchentes, reduzir o efeito ilha de calor e melhorar a qualidade ambiental.

Ele aponta, ainda, a necessidade de revisar planos diretores urbanos para incorporar critérios climáticos, especialmente em regiões vulneráveis. Além disso, estimula mecanismos participativos para engajamento comunitário e integração das políticas públicas locais para gestão de resíduos, saneamento e mobilidade sustentável (BRASIL, 2025b).

## 5.3 Setor Transporte

O Plano Setorial de Adaptação de Transportes foi dividido entre os diferentes modos de transporte, visto que os impactos na infraestrutura se dão de formas diferentes, trazendo um conjunto de 58 ações, distribuídas em 32 metas e 4 objetivos setoriais.

Na aviação civil, os principais riscos estão associados a prejuízos ao bem-estar ou à saúde de passageiros e trabalhadores, interdição ou suspensão de serviços que causem atraso ou cancelamento de voos, aumento de custos e/ou redução de faturamento, além do aumento do risco de acidentes e incidentes aéreos. Esses riscos geram a necessidade de modernização da infraestrutura, reforço de sistemas contra perdas e adoção de práticas de manutenção preditiva.

Na infraestrutura portuária e aquaviária, os riscos envolvem o comprometimento de cadeias produtivas e a logística global, devido ao aumento do nível do mar e de tempestades mais frequentes. Para reduzir esses riscos, é crucial adaptar portos e estruturas a novas condições climáticas, fortalecer sistemas contra inundações e tempestades, e desenvolver tecnologias avançadas de monitoramento.

Da mesma forma, no setor rodoviário, os riscos climáticos derivados de inundações, alagamentos, erosões e altas temperaturas demandam melhorias no planejamento de obras, com sistemas de drenagem eficientes, uso de materiais mais resistentes e estratégias de uso do solo que previnam impactos severos, complementadas por políticas de adaptação regulatória e envolvimento comunitário.

A infraestrutura ferroviária, por sua vez, enfrenta riscos relacionados a altas temperaturas, que deformam trilhos e superaquecem equipamentos, e chuvas intensas que geram inundações e processos erosivos. Para aumentar a resiliência, é necessário empregar materiais mais robustos, ampliar a manutenção preventiva e modernizar sistemas de sinalização e monitoramento.

Estudos de vulnerabilidade específicos para identificar trechos críticos e pontos frágeis — observando exposição a inundações, deslizamentos e erosão — também são pontos importantes para a resiliência dos transportes, bem como a incorporação de critérios climáticos nas obras públicas, uso de materiais resistentes a condições extremas e manutenção preventiva intensificada com monitoração constante. A diversificação modal para aumento da redundância visa reduzir impactos sistêmicos de falhas em qualquer segmento do transporte (BRASIL, 2025c).

## 5.4 Setor Recursos Hídricos

De maneira geral, as principais ameaças climáticas em relação à água no Brasil estão ligadas a extremos de seca e chuvas intensas. Regiões como o Nordeste enfrentam crescente escassez de água devido à redução das chuvas e à desertificação, agravando a crise hídrica. Já o Sudeste, que concentra grande parte da população e atividade econômica, sofre com a irregularidade das chuvas e a pressão sobre os reservatórios, como visto na crise de abastecimento de água na região Sudeste, em 2014 e 2024. As enchentes e os deslizamentos também representam riscos, principalmente em áreas urbanas vulneráveis, como nas regiões metropolitanas do Rio de Janeiro e São Paulo, onde chuvas intensas sobrecarregam a infraestrutura de drenagem e a de abastecimento de água (captação, tratamento e distribuição de água). Em 2024, o Rio Grande do Sul foi afetado

por uma das piores crises de enchentes de sua história, atribuída ao aumento da frequência de eventos climáticos extremos, intensificados pela mudança do clima. Além disso, a Amazônia, com sua vasta rede de rios, enfrenta ameaças devido ao desmatamento e à mudança no regime de chuvas, que estão alterando o ciclo hidrológico da região e afetando não apenas o Brasil, mas toda a América do Sul. (BRASIL, 2025d).

Para análise e priorização dos riscos relacionados aos recursos hídricos, foram combinados os indicadores de segurança hídrica e o possível impacto da mudança do clima na disponibilidade hídrica futura nas diferentes regiões e municípios do país. A Figura 09 apresenta os municípios com índices mais críticos.

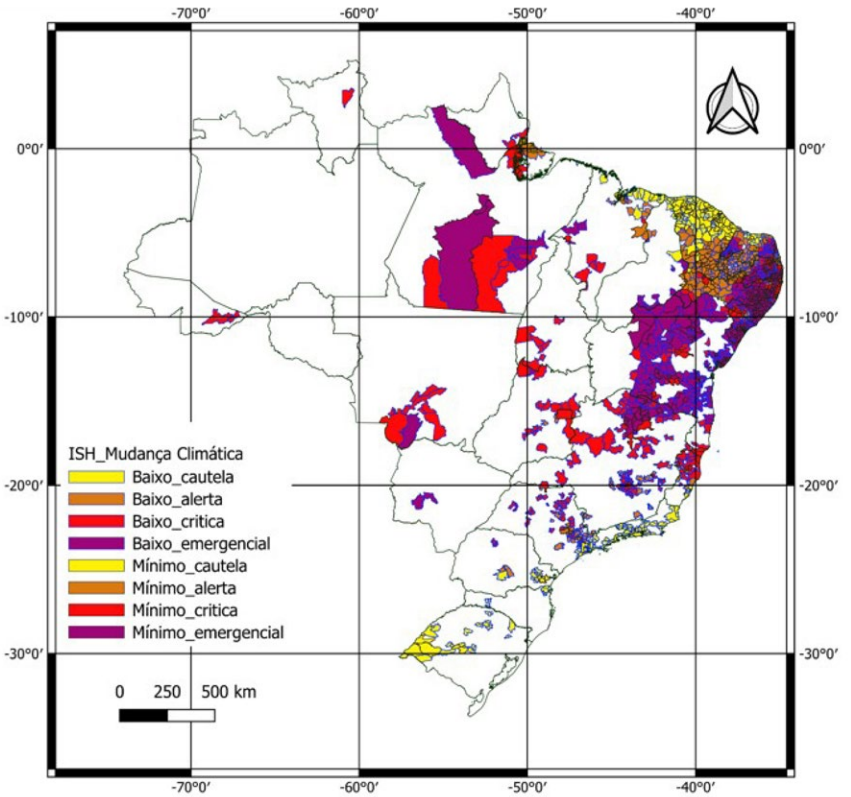



**Figura 9:** Combinação da classificação do Índice de Segurança Hídrica (ISH) municipalizado e a classificação do impacto potencial da mudança do clima na disponibilidade hídrica (IPMCDH) considerando classes Baixo e Mínimo do ISH agregado *(ANA, 2024)*

Neste plano setorial, entre as 43 medidas para lidar com os cenários climáticos projetados, destaca-se a gestão integrada e multifuncional dos recursos hídricos, com ênfase no fortalecimento dos comitês de bacias e nos sistemas de alerta precoce para secas e enchentes. O plano propõe, ainda, a ampliação de infraestruturas resilientes, como reservatórios, sistemas de captação descentralizada e saneamento que considere variações climáticas, e fomenta o uso de tecnologias para o monitoramento contínuo da disponibilidade hídrica e a promoção de práticas conservacionistas que garantam a recarga dos aquíferos, principalmente em regiões semiáridas (BRASIL, 2025d).

## 6. RECOMENDAÇÕES E CAMINHOS PARA FORTALECER A RESILIÊNCIA CLIMÁTICA NAS INFRAESTRUTURAS BRASILEIRAS

A construção da resiliência climática das infraestruturas brasileiras requer um conjunto integrado de ações que enfrentem não apenas os desafios técnicos, mas também as fragilidades institucionais e normativas existentes. Com base nos desafios da necessidade de diminuir o gap de infraestrutura brasileira e nos riscos e ações prioritárias identificadas nos Planos Setoriais de Adaptação da infraestrutura, destacam-se as seguintes recomendações estratégicas:

- Reforçar a confiabilidade e integração dos estudos climáticos e de vulnerabilidade, promovendo a melhoria contínua da qualidade dos dados e metodologias, além de articular os diferentes estudos e planos temáticos preexistentes de forma coerente, para evitar sobreposição e lacunas de informação;
- Superar a dificuldade de priorização das mudanças climáticas entre as múltiplas agendas governamentais, criando mecanismos claros e institucionalizados que garantam que o enfrentamento dos riscos climáticos seja tratado como questão estratégica, com recursos e governança dedicados;
- Fortalecer a capacidade institucional e a coordenação intergovernamental, diminuindo a fragilidade da resposta pública

aos riscos climáticos e promovendo a articulação entre entes federativos governamentais e sociedade civil;

- Combater a postergação das decisões relativas às medidas adaptativas, que contrapõem o princípio da precaução fundamental do direito ambiental, por meio da incorporação da gestão proativa de riscos climáticos como critério obrigatório nos processos decisórios;
- Adequar e atualizar normativas, padrões técnicos e regulatórios relativos a projetos, obras e manutenção de infraestruturas, para garantir a incorporação efetiva de critérios climáticos e de resiliência desde as fases iniciais de planejamento até a execução e operação, em face da alteração dos padrões climáticos atuais e futuros;
- Promover a incorporação sistemática de soluções que minimizem os impactos climáticos em projetos e obras para aumento de sua resiliência, superando resistências técnicas e institucionais por meio de capacitação, incentivos e monitoração de resultados;
- Intensificar o fomento à inovação tecnológica e ao uso de infraestruturas verdes e soluções baseadas na natureza como complementos essenciais às infraestruturas tradicionais, para garantir multifuncionalidade e custo-efetividade na adaptação;
- Garantir o monitoramento contínuo, a transparência e a participação social em todas as etapas, favorecendo a construção coletiva de conhecimento e a adaptação iterativa das estratégias à evolução dos cenários climáticos e das vulnerabilidades detectadas;
- Garantir meios de implementação adequados para o financiamento de ações de adaptação na infraestrutura, tanto através da provisão de recursos financeiros com grau de concessionalidade e escala adequados, mas também com o fortalecimento da capacidade institucional dos atores, em especial dos entes subnacionais, para acessar recursos;
- Estabelecimento de critérios financeiros diferenciados — como, por exemplo, desconto nas taxas de juros e/ou prazos

de carência alongados — nos financiamentos públicos para obras de infraestrutura que considerem o risco climático nos projetos e que tenham medidas específicas para a ampliação da resiliência climática, em linha com o realizado no crédito agrícola para práticas sustentáveis de produção.

Essas recomendações reforçam a necessidade de que as ações para a resiliência climática sejam parte integrante das políticas públicas, normativas e práticas institucionais, alinhadas a um processo dinâmico e multidimensional que preveja a complexidade dos riscos e a diversidade dos contextos brasileiros.

## 7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O panorama apresentado evidencia que as mudanças climáticas impõem desafios crescentes à sustentabilidade e à segurança das infraestruturas brasileiras, setores cuja robustez é fundamental para o funcionamento da sociedade e da economia do país. A diversidade territorial, climática e socioeconômica do Brasil amplia a complexidade da vulnerabilidade das infraestruturas, exigindo respostas específicas e adaptativas que considerem as distintas realidades regionais e setoriais.

As perdas econômicas e sociais derivadas de eventos climáticos extremos, junto à limitada capacidade de investimento e fragilidade institucional, ressaltam a urgência de fortalecer a resiliência climática da infraestrutura nacional. Esse fortalecimento requer a integração sistemática dos conhecimentos científicos mais recentes, a articulação entre as políticas públicas e a incorporação de critérios climáticos nos processos de planejamento, execução e manutenção de obras e serviços.

O Plano Clima, por meio da Estratégia Nacional de Adaptação (ENA) e dos Planos Setoriais de Adaptação (PSAs), representa um marco fundamental, como guia para as políticas públicas e medidas práticas voltadas para o incremento da resiliência climática das infraestruturas. Contudo, sua efetividade dependerá da superação dos desafios estruturais, como a insuficiência de recursos finan-

ceiros, a capacidade técnica dos entes federativos, a governança multissetorial e a articulação interinstitucional.

Destaca-se a necessidade premente de adotar uma abordagem preventiva e proativa, em consonância com o princípio da precaução, combatendo a postergação das decisões que impactam a infraestrutura e, consequentemente, a segurança da população. A normatização técnica deve evoluir para garantir que os projetos e obras incorporarem soluções resilientes e sustentáveis, minimizando riscos futuros e aumentado a capacidade adaptativa da infraestrutura.

O Brasil detém condições e instrumentos para liderar um processo de adaptação que permita não apenas proteger seus ativos infraestruturais, mas também contribuir para o desenvolvimento sustentável e a redução das desigualdades frente aos impactos climáticos. O sucesso dessa agenda dependerá da força do compromisso político, da ampliação da governança cooperativa e da inclusão de múltiplos atores no esforço contínuo de construção de resiliência, assegurando a funcionalidade das infraestruturas e o bem-estar das atuais e das futuras gerações.

## REFERÊNCIAS


ABDIB – **Livro Azul da Infraestrutura**. 2024. Disponível em: https://www.abdib.org.br/. Acessado em 24 de julho de 2025.

BARNETT, J.; O'NEILL, S. Maladaptation. **Global Environmental Change**, v. 20, n. 2, p. 211-213, 2010. DOI: https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2009.11.004.

ANA - **Impacto da Mudança Climática nos Recursos Hídricos no Brasil** / Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. - Brasília : ANA, 2024. Disponível em: https://metadados.snirh.gov.br/geonetwork/srv/api/records/31604c98-5bbe--4dc9-845d-998815607b33/attachments/Mudancas_Climaticas_25012024.pdf. Acessado em 28 de julho de 2025.

BRASIL. **Ministério da Integração e do Desenvolvimento Regional**. Secretaria de Proteção e Defesa Civil. Universidade Federal de Santa Catarina. Centro de Estudos e Pesquisas em

Engenharia e Defesa Civil. Atlas Digital de Desastres no Brasil. Brasília: MIDR, 2023.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **Estratégia Nacional de Adaptação à Mudança do Clima**. Brasília, 2025. Disponível em: https://brasilparticipativo.presidencia.gov.br/processes/planoclima/f/315/. Acesso em: 23 jul. 2025.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **Consulta pública do Plano Setorial de Adaptação – Energia**. Brasília, 2025a. Disponível em: https://brasilparticipativo.presidencia.gov.br/processes/planoclima/f/667/. Acesso em: 23 jul. 2025.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **Consulta pública do Plano Setorial de Adaptação – Cidades**. Brasília, 2025b. Disponível em: https://brasilparticipativo.presidencia.gov.br/processes/planoclima/f/667/. Acesso em: 23 jul. 2025.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **Consulta pública do Plano Setorial de Adaptação – Transporte**. Brasília, 2025c. Disponível em: https://brasilparticipativo.presidencia.gov.br/processes/planoclima/f/667/. Acesso em: 23 jul. 2025.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **Consulta pública do Plano Setorial de Adaptação – Recursos Hídricos**. Brasília, 2025d. Disponível em: https://brasilparticipativo.presidencia.gov.br/processes/planoclima/f/667/. Acesso em: 23 jul. 2025.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **Website Plano Clima Adaptação**. Brasília, 2025f. Disponível em: https://www.gov.br/mma/pt-br/composicao/smc/plano-clima/plano-clima-adaptacao. Acessado em 28 de julho de 2025.

BRASIL. Ministério da Integração e do Desenvolvimento Regional. Secretaria de Proteção e Defesa Civil; Universidade Federal de Santa Catarina. Centro de Estudos e Pesquisas em Engenharia e Defesa Civil. **Atlas Digital de Desastres no Brasil**. Brasília: MIDR, 2025g. Disponível em: http://atlasdigital.mdr.gov.br

CDRI. **Global Infrastructure Resilience—Capturing the Resilience Dividend**. New Delhi; 2023. Disponível em: https://cdri.

world/upload/biennial/CDRI_Global_Infrastructure_Resilience_Report.pdf. Acessado em 25 de julho de 2025.

IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change. **Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability**. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2022. Disponível em: https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg2/. Acesso em: 23 jul. 2025.

KUMAR, S. et al. **Climate change impact on urban infrastructure: A review**. Sustainable Cities and Society, v. 71, p. 102995, 2021. DOI: https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.102995.

MUIR-WOOD, R. **Spatial dependencies and cascade effects in natural catastrophe risk**. Annals of the New York Academy of Sciences, v. 1185, n. 1, p. 165-191, 2010. DOI: https://doi.org/10.1111/j.1749-6632.2009.05133.x.

PACHARKE, C. et al. **Climate risk and adaptation in critical infrastructure: A review**. United Nations Environment Programme, 2021. Disponível em: https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/34716/CriticalInfrastructure.pdf. Acesso em: 23 jul. 2025.

VERSCHUUR, J. et al. **Quantifying climate risks to infrastructure systems: A comparative review of developments across infrastructure sectors**. PLOS Climate, v. 3, n. 4, p. e0000331, 2024. https://doi.org/10.1371/journal.pclm.0000331

1

# CLIMATE RESILIENCE IN BRAZILIAN INFRASTRUCTURES AND THE ADAPTATION AGENDA OF THE CLIMATE PLAN

ÉRICO ROCHA,
INAMARA MÉLO
AND THIAGO OLANTE CASAGRANDE

## SUMMARY

Asset losses and service disruptions caused by disasters and climate risks significantly jeopardize infrastructure investments, estimated at more than US$ 700 billion annually globally and more than R$ 421 billion between 2014 and 2023 in Brazil. Infrastructures present different degrees of exposure and vulnerability—despite often sharing the same territory, infrastructures are affected in different ways and degrees by climate impacts, requiring specific approaches to increase their resilience. The gap in infrastructure investments in Brazil makes this increase even more challenging. The Climate Plan will be the main guide for Brazilian climate policies until 2035, which is why it is one of the central themes of this article, with the objective of relating the climate vulnerabilities of Brazilian infrastructure with the Brazilian instruments of climate governance. A bibliographic research was carried out on the panorama of climate impacts on national and international infrastructure, making the connection with the main planning instruments of the sector: the National Adaptation Strategy (Estratégia Nacional de Adaptação – ENA) and the Sectoral Adaptation Plans (Planos Setoriais de Adaptação – PSAs).

**Keywords**

Resilient infrastructure; Climate risk; Planning.

## 1. INTRODUCTION

Global climate change is a pressing challenge for sustainable development, especially in countries with large territorial extension and socio-environmental diversity, such as Brazil. Among the sectors most sensitive to climate impacts are infrastructure, which forms the backbone of economic activities and social well-being. Extreme weather events, such as intensified rainfall, persistent droughts, heat waves, and rising sea levels, have affected the integrity and operation of these infrastructures, requiring institutional and technical adjustments aimed at adaptation and resilience (IPCC, 2022; BRAZIL, 2025).

Modern infrastructure is particularly vulnerable to a range of climate threats, such as floods, wildfires, cyclones and extreme temperature variations. The magnitude of climate impacts can be expressed by direct damage, revenue losses, and disruption of critical services (Verschuur *et al.*, 2024).

> "*Asset losses and service disruptions associated with disasters and climate risks erode a significant proportion of the new capital investments needed for countries to address their infrastructure deficits. Considering an estimated average annual loss of more than $700 billion in infrastructure and buildings, new infrastructure investments without increasing resilience are analogous to pouring water into a bamboo basket.*" (CDRI, 2023)

Because it has an economy strongly based on natural resources, with a large portion of the population living in risk areas and coastal zones, Brazil is among the countries most vulnerable to climate change. The Digital Atlas of Disasters in Brazil shows that, between 2015 and 2024, 84.5% of the 5,570 Brazilian municipalities were affected, causing damages of more than R$ 455.5 billion. During this period, 1.67 million homes were damaged, 293 thousand homes were destroyed and 324.6 million people were affected. Of this total, 5.9 million people were directly affected, excluding those affected by the shortage of goods and services. The AdaptaBrasil platform, run by the Ministry of Science, Technology and Innovation

(Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação – MCTI), identified just over half of the 5,570 Brazilian municipalities with a high or very high vulnerability index to geo-hydrological disasters, such as floods and landslides, as shown in the map below. Also, according to the platform, 48% of the country's municipalities (2,263) have low or very low capacity in the face of drought events. (BRASIL, 2025).

This chapter aims to provide an environmental overview of the climate risks that affect Brazilian infrastructures, considering the regional specificities, the diversity of infrastructure systems and the interconnection between them. In addition, we aligned the discussion with the public policies that will serve as a guide for the climate resilience of Brazilian infrastructure in the coming years, the Climate Plan and, in particular, the National Adaptation Strategy (Estratégia Nacional de Adaptação – ENA) and the Sectoral Adaptation Plans (Planos Setoriais de Adaptação – PSAs) related to the sectors of Energy, Cities, Transport, Water Resources and Risk and Disaster Reduction and Management, which are in the last stages of completion, with the public consultation already closed.

The main objective is to provide policymakers, public managers, researchers and other interested actors with a grounded and purposeful diagnosis to strengthen the resilience of Brazilian infrastructures to climate change, injecting current knowledge and sector-specific guidelines into the debate.

## 2. OVERVIEW OF INFRASTRUCTURES IN BRAZIL AND ITS CLIMATE VULNERABILITY

Brazil has a complex infrastructure network, with great functional and territorial diversity. The energy matrix still depends largely on hydroelectric sources (about 60% of the installed capacity), but it has been making progress in the incorporation of alternative renewable energies. The transportation sector covers highways, railways, waterways, ports and airports, wich are fundamental instruments for domestic and international trade. Basic sanitation, despite recent progress, remains deficient in a large part of the territory, with a direct impact on public health and environmental quality of cities.

According to the Brazilian Association of Infrastructure and Basic Industries (Associação Brasileira da Infraestrutura e Indústrias de Base – Abdib), the year 2024 presented the highest investment in infrastructure in the historical series since 2010, with emphasis on the largest private investment in the series, as shown in Figure 1.

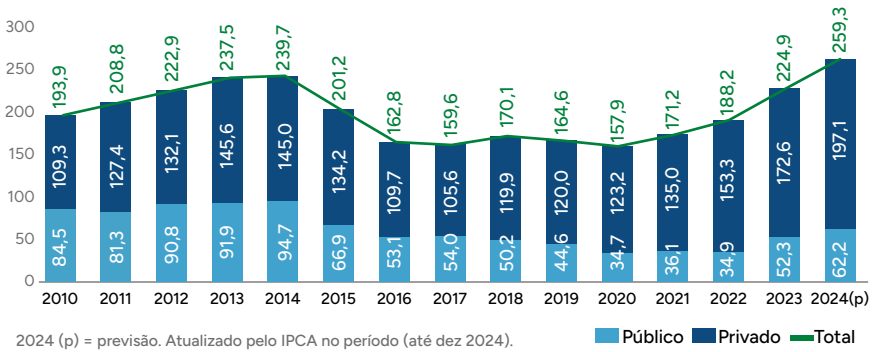



**Figure 1:** Public and Private Investment in Infrastructure (in R$ billion) – In constant values of 2024 *(ABDIB, 2024)*

Record investment, however, still falls far short of the investment needed in infrastructure, creating a substantial deficit, particularly in the transportstion/logistics sector. Figure 2 shows the estimate of the investment gap by sector.

| Sector | Investment Made 2024 (p) | | Required Investment | | GAP Investments | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | R$ Billions | in % GDP | R$ Billions | in % GDP | R$ Billions | in % GDP |
| Transportation /Logistics | 63.0 | 0.54 | 264.4 | 2.26 | 201.4 | 1.72 |
| Electrical Energy | 119.3 | 1.02 | 98.3 | 0.84 | None | None |
| Telecommunications | 43.0 | 0.37 | 88.9 | 0.76 | 45.9 | 0.39 |
| Sanitation | 34.0 | 0.29 | 52.7 | 0.45 | 18.7 | 0.16 |
| **Total** | **259.3** | **2.22** | **503.4** | **4.31** | **266.0** | **2.27** |

**Figure 2:** Reality and Need for Infrastructure Investments per Year (in the next ten years) Current R$ billion *(ABDIB, 2024)*

These infrastructures are distributed in different biomes and in urban, peri-urban, and rural contexts, which present varying

degrees and types of climate exposure and vulnerability. According to Pacharke *et al.* (2021), the vulnerability of infrastructures to climate risks refers not only to physical exposure, but also to the capacity for resistance, absorption, and recovery after adverse events, often limited by technical fragility, inadequate management, and insufficient resources.

Urban regions, especially large cities in the Southeast, Northeast, and South, face frequent urban floods and landslides, which damage road networks, drainage, and electrical systems (BRASIL, 2025). The Northeast, on the other hand, concentrates significant risks of prolonged drought, affecting water infrastructure for supply and irrigation. The North Region, wich is highly depenent on hydroelectric plants linked to the Amazon biome, is particularly vulnerable to deforestation and alteration of the hydrological cycle (IPCC, 2022).

Recent crises highlight these vulnerabilities. In 2021, the national water crisis affected the energy system, exposing the fragility of the hydroelectric matrix in the face of extreme events. In the south of the country, floods caused major interruptions in road and rail transport, with negative repercussions on the logistics chain. These events illustrate the urgent need for adaptation and strategic planning (BRASIL, 2025).

Different types of infrastructure have different degrees of exposure and vulnerability to dominant climate threats. Roads and railways are especially sensitive to flooding; ports and airports are notable for their exposure to rising sea levels, storms and extreme winds; while water systems suffer from prolonged droughts. Recent events demonstrate how sectors can have differentiated impacts and recoveries in varying timeframes, with critical interdependencies across services (Verschuur *et al.*, 2024).

In Figure 3, translated from Verschuur *et al.*, 2024, the authors mapped the differences in the impacts and vulnerabilities of infrastructures on a global scale, demonstrating that, although infrastructures often share the same territory, they are affected in different ways and degrees by climate impacts, requiring specific approaches to increase their resilience.

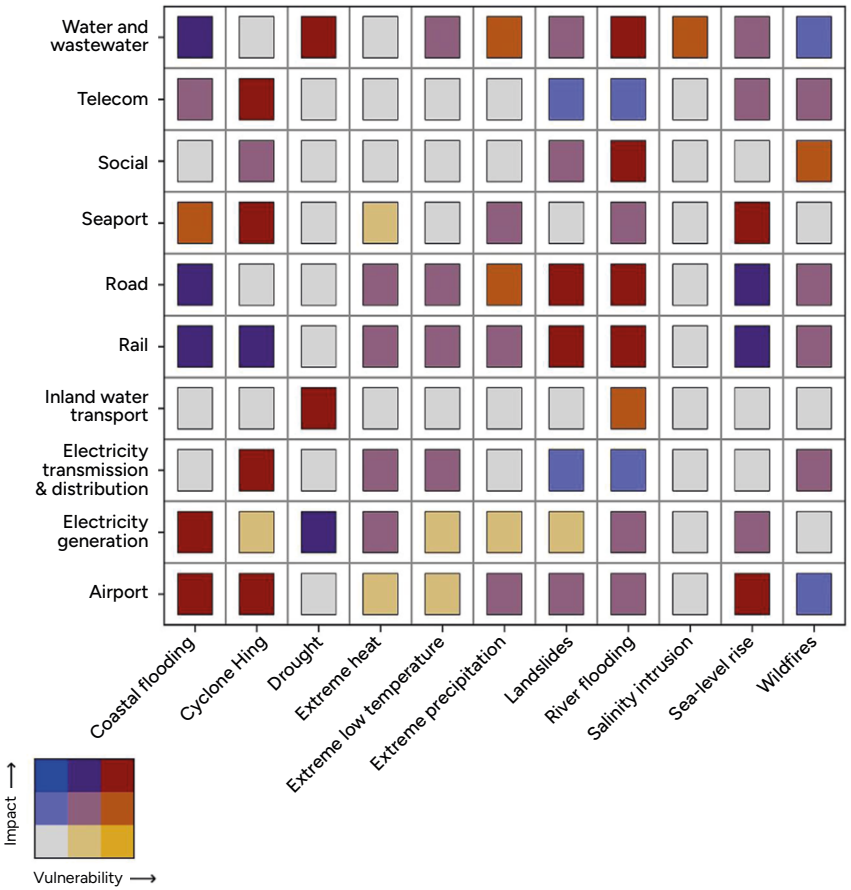



**Figure 3:** Bivariate graph showing the vulnerability and impacts of combinations of climate risks and types of infrastructure

For each combination of climate risk and infrastructure, the infrastructure's vulnerability to that risk is characterized as low, medium, or high (light to dark). Similarly, the impact of infrastructure disruptions in the event of a climate risk occurring is characterized as low, medium, or high (from light to dark). Taken together, this creates a risk rating system with nine different types of combinations, as indicated by the colors. This characterization is based on the authors' expert judgment (Verschuur *et al.*, 2024).

## 3. CLIMATE RISKS AND RESILIENCE APPLIED TO INFRASTRUCTURE

Climate risk results from the interaction between exposure to adverse climate events , the vulnerability of the affected systems, and the ability to adapt and mitigate to these stimuli (IPCC, 2022). Vulnerability includes physical (state of equipment, location), institutional (governance, budget), and social (affected populations) aspects, while adaptation involves measures that increase the system's capacity to prepare, resist, recover, and improve in the face of threats (Pacharke et al., 2021).

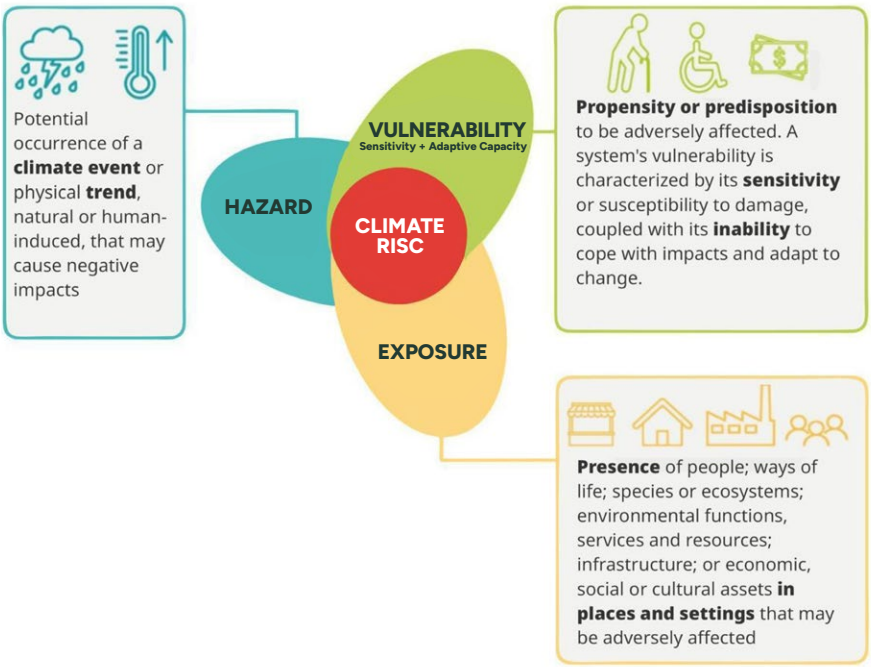



**Figure 4:** The risk analysis considers the composition of hazard, exposure, and vulnerability information *(BRASIL, 2025, apud IPCC, 2022)*

Climate resilience is the key concept for the infrastructure approach, defined as the ability of systems to maintain their functioning during and after climate shocks, limiting losses and quickly

restoring full operation. According to Barnett and O'Neill (2010), it is essential to avoid "maladaptation", which generates new risks or amplifies existing vulnerabilities.

In addition, analyzing the interdependence of infrastructure is crucial. Muir-Wood (2010) highlights that failures in one piece of infrastructure, such as the energy system, can trigger failures in transport, water supply and telecommunications, causing serious cascading effects.

## 3.1. Diagnosis of the environmental picture of climate risks in Brazilian infrastructures

Brazil presents a heterogeneous picture in terms of climate vulnerability. Metropolitan areas are at high risk due to accelerated urbanization without adequate environmental planning, an increase in urban heat islands, and soil sealing, which aggravates floods (BRASIL, 2025). Semi-arid regions face challenges due to reduced water availability and highly irregular rainfall.

Recent maps and monitoring data point to the growth in the frequency and intensity of extreme events, such as intense storms, heat waves, droughts, and coastal flooding (IPCC, 2022). Rising sea levels threaten port infrastructures, coastal urban areas, and sanitation systems (BRASIL, 2025). The impacts are amplified by poor land use practices, deforestation and environmental degradation, which reduce the natural capacity for flood control and water regeneration, in addition to aggravating patterns of social vulnerability.

The interdependence between infrastructure reinforces complexity: failures in energy networks affect drainage and supply; damage to transportation hinders emergency responses to disasters; loss in sanitation systems impacts public health, creating a vicious circle of increasing fragilities and risks (Muir-Wood, 2010; Pacharke *et al.*, 2021).

Figures 5 and 6 make a historical review of the main extreme weather events related to severe changes in rainfall patterns, as well as droughts and fires, since 2010.

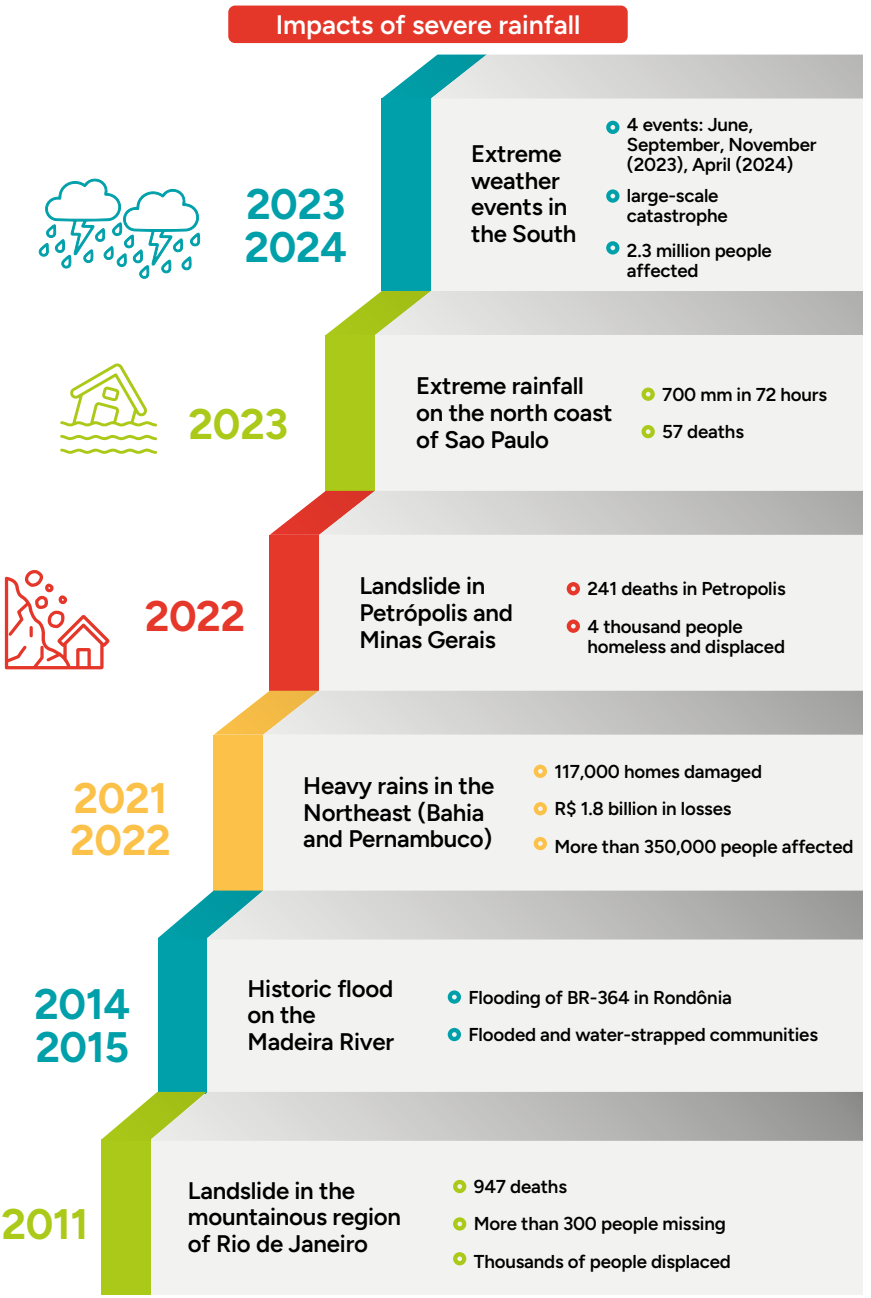
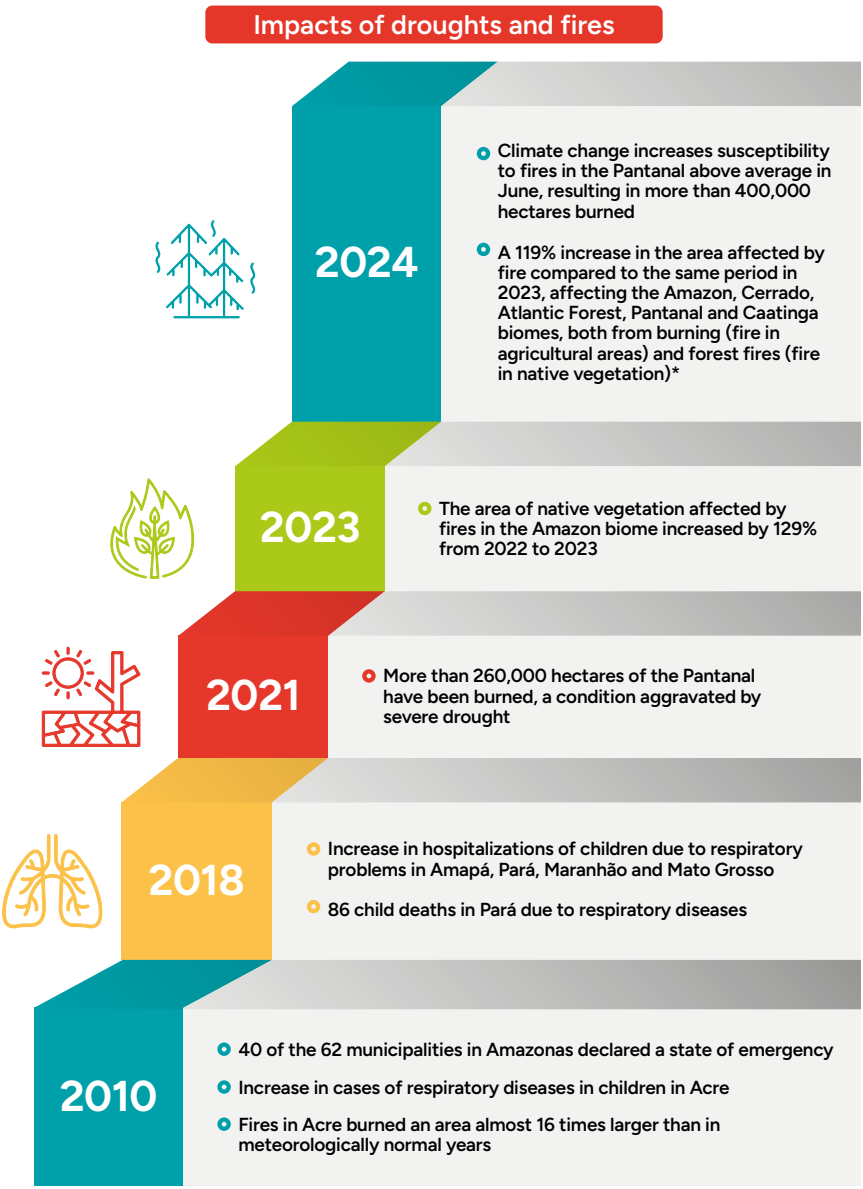



**Figure 5:** Timeline on impacts of severe rainfall in Brazil between 2011 and 2024 *(BRASIL, 2025, apud, Digital Atlas of Disasters in Brazil (Brasil, 2025g)*




*Data for the first half of 2023 and 2024

**Figure 6:** Impacts of droughts and fires in Brazil between 2010 and 2024
*(BRASIL, 2025, apud, SMITH et al., 2015; PINHO, 2016; ALENCAR et al., 2023 and BARNES, SANTOS, LIBONATI et al., 2024)*

# 4. CLIMATE PLAN AND INFRASTRUCTURE ADAPTATION

Brazilian climate governance has as its main public policy the National Policy on Climate Change, having as one of its main instruments the National Plan on Climate Change, known as the Climate Plan. The structure of the Climate Plan is based on the aspects of mitigation and adaptation, containing Strategies and Sectoral Plans that are detailed below.

## 4.1. Structure of the Climate Plan

The Climate Plan will be the main guide for public policies to tackle climate change in Brazil. With a horizon until 2035, the Climate Plan will have two pillars. The first is the National Mitigation Strategy, to reduce net emissions of greenhouse gases, whose high concentration in the atmosphere causes global warming. The second is the National Adaptation Strategy, to reduce the vulnerability of cities, sectors, populations, and natural environments to climate change and ensure better conditions for the country to face extreme weather events. The mitigation and adaptation components will also have sectoral and thematic plans: there are seven for mitigation and sixteen for adaptation. The Climate Plan also brings Cross-Cutting Strategies for Climate Action, which will define means of implementation (such as financing, governance, and training) and measures for the just transition, among other points. Figure 7 represents the summary of the structure of the 2024-2035 Climate Plan.

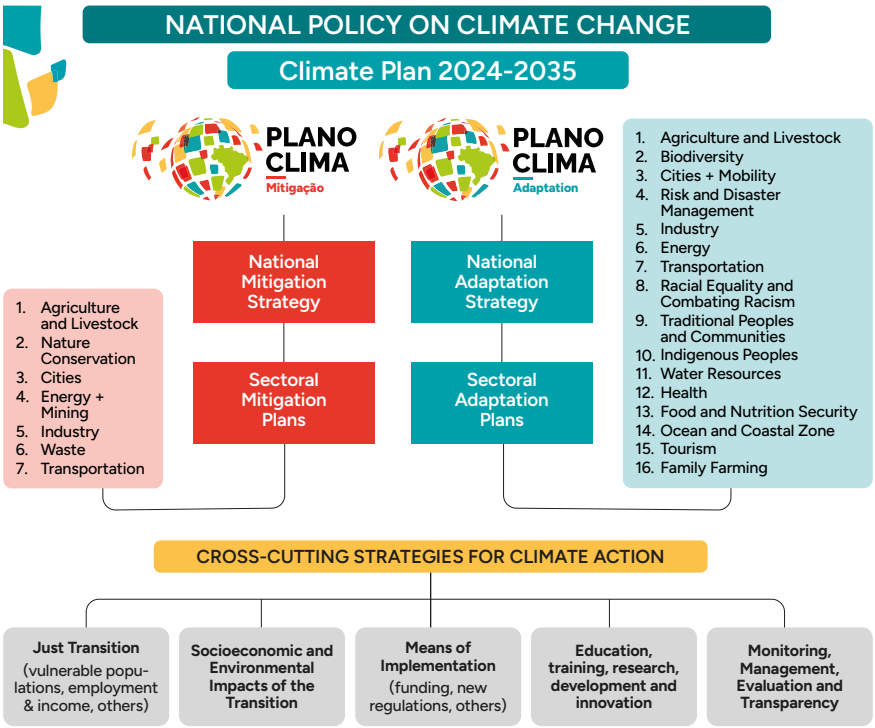



**Figure 7:** Structure of the Climate Plan

## 4.2. National Adaptation Strategy (ENA) and the Sectoral Adaptation Plans (PSAs) for infrastructure

The National Adaptation Strategy (BRASIL, 2025) establishes guidelines for the design and implementation of adaptation actions at the **federal, state, and municipal levels**:

> 1. *Promotion of sustainable development in its multiple dimensions, considering strategic sectors and themes for the country, with a view to reducing inequalities, equity and just transition;*
>
> 2. *Promotion of climate justice based on its dimensions of gender, race, ethnicity, age, social class, geographic origin, and other factors that influence vulnerability;*
>
> 3. *Promotion of environmental protection, conservation and preservation, guided by the principles of precaution and prevention;*

4. *Multilevel and transversal governance, with a view to coherence, synergy and complementarity between strategies, considering territorial specificities*;

5. *Promotion of transparency and participatory processes with society, throughout the iterative cycle of adaptation*;

6. *Integration of adaptation into policies, programs and projects that may be affected by climate change, contemplating structuring initiatives and including a long-term perspective*;

7. *Strengthening institutional capacities at the different levels of government, including those necessary for access to sources of financing and means of implementation for adaptation measures appropriate to each context*;

8. *Promotion of co-benefits between adaptation and mitigation of GHG emissions*;

9. *Adoption of the best available knowledge, based on science, good sectoral and societal practices, traditional knowledge and other sources considered appropriate*;

10. *Integration of incremental and transformational actions, based on the understanding of climate-related risks and their multiple conditioning factors, with different time horizons and scales of execution*;

11. *Promoting public awareness and awareness of climate change, its causes, consequences and approaches to risk reduction*;

12. *Adoption of the Ecosystem-based Adaptation (EbA) approach, recognizing its potential to reduce climate risks and vulnerabilities in a systemic, flexible, socially just and cost-effective way, and benefits for mitigation efforts, simultaneously*;

13. *Ensuring the flexibility and adaptability of strategies, with revisions of the Plan and changes in context, in order to incorporate updates of information and knowledge generated, as well as lessons learned.*

With the upcoming publication of the Sectoral Adaptation Plans (PSAs), the strategic sectors will have specific guidelines, contributing to greater detail and operationalization of the ENA.

# 5. CHALLENGES AND OPPORTUNITIES FOR MANAGING CLIMATE RISKS IN INFRASTRUCTURE

The challenges to implement the ENA and PSA guidelines center on the difficulty of mobilizing substantial financial resources, the need for decentralized technical training, the insufficiency of fine meteorological and climatic data for local planning, and the complex Brazilian institutional governance, marked by overlapping competencies and low articulation between federative entities (Pacharke *et al.*, 2021; BRASIL, 2025).

Another important challenge is cultural and institutional resistance to change, which can delay the incorporation of sustainable and innovative practices. However, the climate crisis also opens up opportunities for technological modernization, such as the use of high-resolution satellites, IoT (Internet of Things) sensors for continuous monitoring, and artificial intelligence for forecasting and planning (Kumar *et al.*, 2021).

The introduction of green infrastructure, with nature-based solutions (NbS), offers multiple benefits, from regulating the hydrological cycle to the increase of urban biodiversity and social co-benefits, configuring itself as a strategic and cost-effective approach (BRASIL, 2025b).

In addition, building local capacities, strengthening participatory governance, and transparency are essential conditions for the sustainability of adaptive actions over time.

Of the 16 Sectoral Adaptation Plans, as detailed in Figure 7, those most closely related to infrastructure were selected to summarize the main risks highlighted and the actions planned for adaptation: Energy, Cities, Transportation and Water Resources.

## 5.1 Energy Sector

The priority risks listed in the Energy Sector Plan are summarized in Figure 8, linking the risk to the main climate threats that cause it

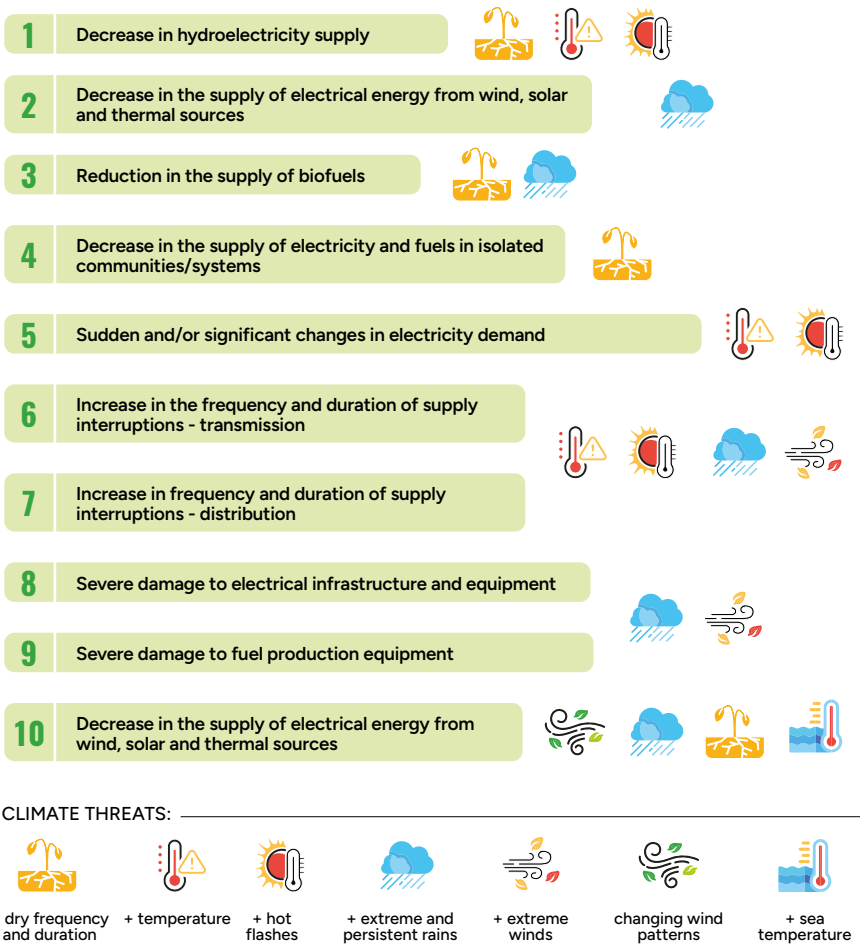



**Figure 8:** Priority risks in the energy sector, associated with climate threats.
*(BRASIL, 2025a)*

The Sectoral Adaptation Plan for the Energy sector presents three sectoral objectives, to be achieved through a set of 16 goals and 38 short-, medium- and long-term actions. These objectives adress: I - ensuring the supply and access of electricity in the face of climate threats, promoting the fight against energy poverty; II - ensuring the supply of fuels, especially biofuels and low carbon intensity fuels, in the face of climate threats; and, finally, III- implement and strengthen the resilience of infrastructure in the energy sector.

Among the measures, the plan guides investment in alternative renewable sources (solar, wind, biomass) and energy storage technologies, such as batteries and green hydrogen, to ensure continuity of supply in adverse situations. It is worth noting that these actions are also aligned with the actions defined in the Sectoral Energy Mitigation Plan, which seeks to present priority actions for the reduction of greenhouse gas emissions in the sector, especially with regard to energy generation.

It also provides for the modernization of transmission and distribution networks, including the incorporation of intelligent systems (smart grids) for real-time monitoring and rapid fault recovery. These advances aim to increase resilience and reduce the system downtime during climatic events (BRASIL, 2025a).

## 5.2 Cities Sector

Emphasizing that climate risks are presented unevenly in the neighborhoods/territories of municipalities and regions, the Sectoral Plan for Cities points to a major risk posed by climate change: the risk of undermining the right to the city and reducing the quality of urban life for all people, especially the most vulnerable. This risk is detailed by sectors that are decisive for urban life and the right to the city, in order to facilitate the design of actions by specific technical areas. They are:

1. Risk of increased precariousness and inadequacy of housing;
2. Risk of reduction in the quality of service and access to basic sanitation;
3. Risk of reducing the quality of transportation services and the access to urban mobility.

The Plan is structured in 3 sectoral objectives, 8 goals and 19 actions aimed at increasing the resilience of cities in terms of information, knowledge, planning, management, governance, infrastructure and services, seeking a sustainable model of urban development and prioritizing vulnerable territories. In this way, it highlights the role of integrated territorial planning with a focus on climate adap-

tation, recommending the strengthening of urban green infrastructure (parks, permeable areas, ecological corridors) to mitigate floods, reduce the heat island effect and improve environmental quality.

It also points out the need to revise urban master plans to incorporate climate criteria, especially in vulnerable regions. In addition, it encourages participatory mechanisms for community engagement and integration of local public policies for waste management, sanitation and sustainable mobility (BRASIL, 2025b).

## 5.3 Transportation Sector

The Sectoral Plan for Transportation Adaptation was divided among the different modes of transportation, since the impacts on infrastructure occur in different ways, bringing a set of 58 actions distributed in 32 goals and 4 sectoral objectives.

In civil aviation, the main risks are associated with damage to the well-being or health of passengers and workers, interdiction or suspension of services that cause flights delays or cancellations, increased costs and/or reduced revenues, in addition to the increased risk of air accidents and incidents. These risks generate the need to modernize infrastructure, reinforce systems against losses, and adopt predictive maintenance practices.

In port and waterway infrastructure, the risks involve the compromise of production chains and global logistics due to rising sea levels and more frequent storms. To reduce these risks, it is crucial to adapt ports and structures to new climatic conditions, strengthen flood and storm systems, and develop advanced monitoring technologies.

Similarly, in the road sector, climate risks derived from flooding, erosion, and high temperatures demand improvements in construction planning, with efficient drainage systems, use of more resistant materials, and land use strategies that prevent severe impacts, complemented by regulatory adaptation policies and community involvement.

Rail infrastructure, in turn, faces risks related to high temperatures, which deform tracks and overheat equipment, and heavy rains, that generate floods and erosive processes. To incre-

ase resilience, it is necessary to employ more robust materials, expand preventive maintenance, and modernize signaling and monitoring systems.

Specific vulnerability studies to identify critical stretches and fragile points—observing exposure to floods, landslides, and erosion—are also important points for the resilience of transport, as well as the incorporation of climatic criteria in public works, the use of materials resistant to extreme conditions, and intensified preventive maintenance with constant monitoring. Modal diversification to increase redundancy aims to reduce systemic impacts of failures in any segment of transport (BRASIL, 2025c).

## 5.4 Water Resources Sector

In general, the main climate threats related to water in Brazil are linked to extremes of drought and heavy rains. Regions such as the Northeast face increasing water scarcity due to reduced rainfall and desertification, aggravating the water crisis. The Southeast, which concentrates a large part of the population and economic activity, suffers from irregular rainfall and pressure on reservoirs, as seen in the water supply crisis in the Southeast region, in 2014 and 2024. Floods and landslides also pose risks, especially in vulnerable urban areas, such as in the metropolitan regions of Rio de Janeiro and São Paulo, where heavy rains overwhelm drainage and water supply infrastructure (water collection, treatment, and distribution). In 2024, Rio Grande do Sul was affected by one of the worst flood crises in its history, attributed to the increase in the frequency of extreme weather events, intensified by climate change. In addition, the Amazônia state, with its vast network of rivers, faces threats due to deforestation and changing rainfall patterns, which are altering the region's hydrological cycle and affecting not only Brazil, but all of South America. (BRAZIL, 2025d).

To analyze and prioritize risks related to water resources, water security indicators and the possible impact of climate change on future water availability in different regions and municipalities of the country were combined. Figure 09 shows the municipalities with the most critical indexes.

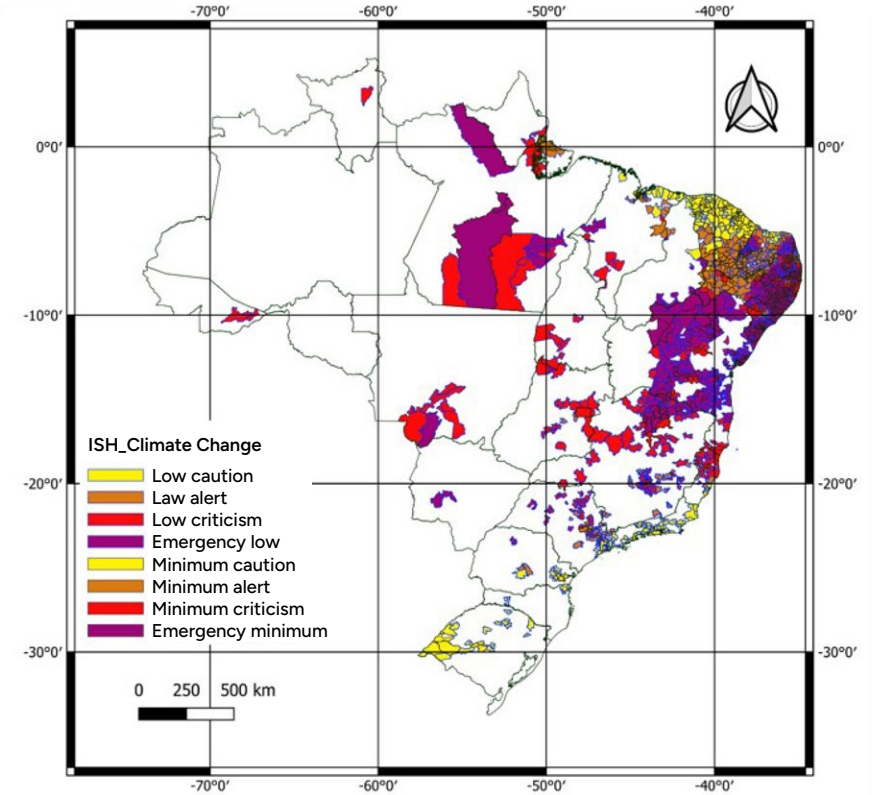



**Figure 9:** Combination of the municipalized Water Security Index (do Índice de Segurança Hídrica – ISH) classification and the classification of the potential impact of climate change on water availability (IPMCDH) considering Low and Minimum classes of the aggregate ISH *(ANA, 2024)*

In this sectoral plan, among the 43 measures to deal with the projected climate scenarios , the integrated and multifunctional management of water resources stands out, with emphasis on strengthening basin committees and early warning systems for droughts and floods. The plan also proposes the expansion of resilient infrastructures, such as reservoirs, decentralized catchment systems, and sanitation that considers climate variations, and encourages the use of technologies for the continuous monitoring of water availability and the promotion of conservationist practices that ensure the recharge of aquifers, especially in semi-arid regions (BRASIL, 2025d).

## 6. RECOMMENDATIONS AND WAYS TO STRENGTHEN CLIMATE RESILIENCE IN BRAZILIAN INFRASTRUCTURES

Building the climate resilience of Brazilian infrastructures requires an integrated set of actions that address not only the technical challenges, but also the existing institutional and regulatory weaknesses. Based on the challenges of the need to reduce the Brazilian infrastructure gap and the risks and priority actions identified in the Sectoral Infrastructure Adaptation Plans, the following strategic recommendations stand out:

1. Reinforce the reliability and integration of climate and vulnerability studies, promoting the continuous improvement of the quality of data and methodologies, in addition to articulating the different pre-existing studies and thematic plans in a coherent way, to avoid overlap and information gaps;
2. Overcome the difficulty of prioritizing climate change among multiple government agendas, creating clear and institutionalized mechanisms that ensure that addressing climate risks is treated as a strategic issue, with dedicated resources and governance;
3. Strengthen institutional capacity and intergovernmental coordination, reducing the fragility of the public response to climate risks and promoting articulation between federative governmental entities and civil society;
4. Combat the postponement of decisions on adaptive measures, which contradict the fundamental precautionary principle of environmental law, by incorporating proactive climate risk management as a mandatory criterion in decision-making processes;
5. Adapt and update regulations, technical and regulatory standards related to projects, works and maintenance of infrastructures, to ensure the effective incorporation of climate and resilience criteria from the initial planning phases to execution and operation, in the face of changes in current and future climate patterns;

6. Promote the systematic incorporation of solutions that minimize climate impacts in projects and works to increase their resilience, overcoming technical and institutional resistance through training, incentives, and monitoring of results;
7. Intensify the promotion of technological innovation and the use of green infrastructure and nature-based solutions, as essential complements to traditional infrastructures to ensure multifunctionality and cost-effectiveness in adaptation;
8. Ensure continuous monitoring, transparency, and social participation at all stages, favoring the collective construction of knowledge and the iterative adaptation of strategies to the evolution of climate scenarios and detected vulnerabilities;
9. Ensure adequate means of implementation for the financing of adaptation actions in infrastructure, both through the provision of financial resources with an adequate degree of concessionality and scale, but also by strengthening the institutional capacity of actors, especially subnational entities, to access resources;
10. Establishment of differentiated financial criteria—such as, for example, discounts on interest rates and/or extended grace periods—in public financing for infrastructure works that consider the climate risk in projects and that have specific measures to increase climate resilience, in line with what is done in agricultural credit for sustainable production practices.

These recommendations reinforce the need for actions for climate resilience to be an integral part of public policies, norms, and institutional practices, aligned with a dynamic and multidimensional process that foresees the complexity of risks and the diversity of Brazilian contexts.

## 7. FINAL CONSIDERATIONS

The presented overview shows that climate change imposes increasing challenges to the sustainability and security of Brazilian

infrastructures, sectors whose robustness is fundamental for the functioning of society and the country's economy. Brazil's territorial, climatic, and socioeconomic diversity increases the complexity of infrastructure vulnerability, requiring specific and adaptive responses that consider the different regional and sectoral realities.

The economic and social losses derived from extreme weather events, coupled with limited investment capacity and institutional fragility, underscore the urgency of strengthening the climate resilience of national infrastructure. This strengthening requires the systematic integration of the latest scientific knowledge, coordination between public policies and the incorporation of climate criteria in the processes of planning, execution and maintenance of works and services.

The Climate Plan, through the National Adaptation Strategy (ENA) and the Sectoral Adaptation Plans (PSAs), represents a fundamental milestone, as a guide for public policies and practical measures aimed at increasing the climate resilience of infrastructures. However, its effectiveness will depend on overcoming structural challenges, such as insufficient financial resources, the technical capacity of federative entities, multisectoral governance, and interinstitutional articulation.

The urgent need to adopt a preventive and proactive approach is highlighted, in line with the precautionary principle, combating the postponement of decisions that impact infrastructure and, consequently, the safety of the population. Technical standardization must evolve to ensure that projects and works incorporate resilient and sustainable solutions, minimizing future risks and increasing the adaptive capacity of infrastructure.

Brazil has the conditions and instruments to lead an adaptation process that allows not only to protect its infrastructure assets, but also to contribute to sustainable development and the reduction of inequalities in the face of climate impacts. The success of this agenda will depend on the strength of political commitment, the expansion of cooperative governance, and the inclusion of multiple actors in the ongoing effort to build resilience, ensuring the functionality of infrastructures and the well-being of current and future generations.

## *REFERENCES*


ABDIB – **Blue Book of Infrastructure**. 2024. Available at: https://www.abdib.org.br/ . Accessed July 24, 2025.

BARNETT, J.; O'NEILL, S. Maladaptation. **Global Environmental Change**, v. 20, n. 2, p. 211-213, 2010. DOI: https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2009.11.004.

ANA - **Impact of Climate Change on Water Resources in Brazil** / National Water and Basic Sanitation Agency. -- Brasília: ANA, 2024. Available at: https://metadados.snirh.gov.br/geonetwork/srv/api/records/31604c98-5bbe--4dc9-845d-998815607b33/attachments/Mudancas_Climaticas_25012024.pdf Accessed July 28, 2025.

BRAZIL. **Ministry of Integration and Regional Development**. Secretariat of Civil Protection and Defense. Federal University of Santa Catarina. Center for Studies and Research in Engineering and Civil Defense. Digital Atlas of Disasters in Brazil. Brasília: MIDR, 2023.

BRAZIL. Ministry of the Environment. **National Strategy for Adaptation to Climate Change**. Brasilia, 2025. Available at: https://brasilparticipativo.presidencia.gov.br/processes/planoclima/f/315/. Accessed on: 23 jul. 2025.

BRAZIL. Ministry of the Environment. **Public consultation of the Sectoral Adaptation Plan – Energy**. Brasília, 2025a. Available at: https://brasilparticipativo.presidencia.gov.br/processes/planoclima/f/667/. Accessed on: 23 jul. 2025.

BRAZIL. Ministry of the Environment. **Public consultation of the Sectoral Plan for Adaptation – Cities**. Brasilia, 2025b. Available at: https://brasilparticipativo.presidencia.gov.br/processes/planoclima/f/667/. Accessed on: 23 jul. 2025.

BRAZIL. Ministry of the Environment. **Public consultation of the Sectoral Plan for Adaptation – Transport**. Brasilia, 2025c. Available at: https://brasilparticipativo.presidencia.gov.br/processes/planoclima/f/667/. Accessed on: 23 jul. 2025.

BRAZIL. Ministry of the Environment. **Public consultation of the Sectoral Plan for Adaptation – Water Resources**. Brasilia, 2025d. Available at: https://brasilparticipativo.presidencia.gov.br/processes/planoclima/f/667/. Accessed on: 23 jul. 2025.

BRAZIL. Ministry of the Environment. **Climate Adaptation Plan website**. Brasilia, 2025f. Available at: https://www.gov.br/mma/pt-br/composicao/smc/plano-clima/plano-clima-adaptacao . Accessed July 28, 2025.

BRAZIL. Ministry of Integration and Regional Development. Secretariat of Civil Protection and Defense; Federal University of Santa Catarina. Center for Studies and Research in Engineering and Civil Defense. **Digital Atlas of Disasters in Brazil**. Brasília: MIDR, 2025g. Available at: http://atlasdigital.mdr.gov.br

CDRI. **Global Infrastructure Resilience—Capturing the Resilience Dividend**. New Delhi; 2023. Available at: https://cdri.world/upload/biennial/CDRI_Global_Infrastructure_Resilience_Report.pdf . Accessed July 25, 2025.

IPCC – INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability**. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2022. Disponível em: https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg2/. Acesso em: 23 jul. 2025.

KUMAR, S. et al. **Climate change impact on urban infrastructure: A review**. Sustainable Cities and Society, v. 71, p. 102995, 2021. DOI: https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.102995.

MUIR-WOOD, R. **Spatial dependencies and cascade effects in natural catastrophe risk**. Annals of the New York Academy of Sciences, v. 1185, n. 1, p. 165-191, 2010. DOI: https://doi.org/10.1111/j.1749-6632.2009.05133.x.

PACHARKE, C. et al. **Climate risk and adaptation in critical infrastructure: A review**. United Nations Environment Programme, 2021. Available at: https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/34716/CriticalInfrastructure.pdf. Accessed on: 23 jul. 2025.

VERSCHUUR, J. et al. **Quantifying climate risks to infrastructure systems: A comparative review of developments across infrastructure sectors**. PLOS Climate, v. 3, n. 4, p. e0000331, 2024. https://doi.org/10.1371/journal.pclm.0000331

2

# INVESTIMENTOS EM INFRAESTRUTURA E RESILIÊNCIA CLIMÁTICA: CONCEITOS, DESAFIOS E CAMINHOS

**RODOLFO GOMES BEVEVENUTO, PHD**

## RESUMO

Este capítulo analisa os impactos crescentes das mudanças climáticas sobre os sistemas de infraestrutura, destacando de que forma riscos crônicos e eventos extremos podem comprometer a integridade, a funcionalidade e a longevidade dos ativos, gerando consequências econômicas e sociais expressivas. São apresentados critérios internacionais de classificação de financiamento para adaptação climática, com especial atenção às distinções conceituais entre infraestrutura resiliente e infraestrutura voltada à promoção da resiliência. Enfatiza-se a relevância de intervenções que favoreçam a resiliência sistêmica, indo além da proteção pontual de ativos. O texto também evidencia a persistente lacuna de financiamento para adaptação nos diversos setores de infraestrutura, frente às demandas crescentes e aos entraves à mobilização de capital. Por fim, são discutidas ferramentas para o aprimoramento dos processos de estruturação de projetos com base no Modelo de Cinco Dimensões, destacando seu potencial como alavanca estratégica para ampliar o volume e garantir a qualidade dos investimentos em infraestrutura orientados à construção de sistemas mais resilientes.

**Palavras-chave:**

Financiamento de adaptação; resiliência sistêmica; estruturação de projetos; modelo de cinco dimensões

DOI: 10.66949/v3n8q1t6

# INTRODUÇÃO

As mudanças climáticas configuram-se como um vetor de risco estrutural crescente para os sistemas de infraestrutura. A elevação do nível médio do mar, a intensificação de eventos hidrometeorológicos extremos (como inundações, ondas de calor e tempestades) e o aumento gradual das temperaturas médias globais impactam diretamente a integridade física, a durabilidade e a funcionalidade de ativos de infraestrutura de todos os setores. Esses fatores não apenas elevam os custos de operação e manutenção, mas também comprometem a confiabilidade e a continuidade dos serviços promovidos por tais ativos, com implicações diretas sobre a mobilidade urbana, a logística de abastecimento, a integração regional e o desempenho das cadeias produtivas. Tal contexto exige uma análise dos principais conceitos relacionados, desafios e possíveis estratégias de aumento dos investimentos em infraestrutura que promovam maior resiliência climática, sejam eles públicos ou privados.

Projeções baseadas em cenários climáticos vigentes indicam que, até 2050, o valor líquido de ativos[1] de infraestrutura poderá ser reduzido na média em 4,4%, atingindo perdas de até 26,7% nos cenários mais adversos, em decorrência da intensificação dos riscos físicos relacionados às mudanças climáticas (Darwin e Blanc-Brude, 2023). A análise baseia-se em uma amostra representativa de 700 empresas, para as quais estimativas de risco climático em nível de ativo estão disponíveis na plataforma *InfraMetrics*, da EDHECInfra. A perda financeira estimada para o portfólio de ativos de infraestrutura foi calculada por meio de um modelo probabilístico apresentado por Blanc-Brude e Gupta (2022), que consiste na criação de portfólios simulados, imitando como investidores reais aplicam recursos ao longo do tempo. Observa-se, na Figura 1, um destaque para o setor de transportes, no qual tais perdas podem chegar a 98% do valor dos ativos em cenários mais extremos de mudanças climáticas. Além do prejuízo financeiro sofrido pelos gestores des-

1 NAV ou Net asset value de um ativo de infraestrutura: valor de mercado do ativo menos todos os seus passivos associados, constituindo como uma métrica para avaliar a saúde financeira do ativo.

ses ativos, tais perdas podem comprometer a conectividade territorial, a eficiência logística e a acessibilidade de populações vulneráveis, ampliando desigualdades socioespaciais.

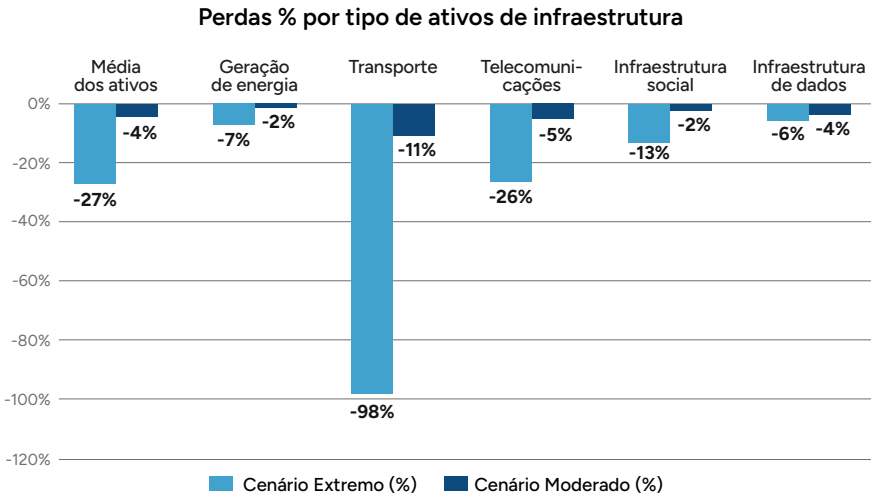



**Figura 1:** Perdas potenciais do valor líquido dos ativos de infraestrutura **devido ao risco físico de mudanças climáticas por cenário até 2050**
*(Fonte: Darwin e Blanc-Brude, 2023)*

É importante mencionar que métricas financeiras mais conhecidas, como *value at risk*, ainda que sejam cada vez mais utilizadas por investidores privados para avaliar retornos ajustados ao risco, ainda deixam de capturar uma dimensão crítica: os impactos econômicos, sociais e ambientais mais amplos que podem comprometer a funcionalidade e os benefícios desses ativos para a sociedade. Isso ocorre pela dificuldade de quantificar os benefícios não financeiros da adaptação. Alguns desses impactos podem ser estimados de maneira mais ampla com base em experiências passadas. Por exemplo, em um relatório recente produzido para o G20, o *World Resources Institue* avaliou 320 investimentos em adaptação em agricultura, água, infraestrutura e saúde em 12 países entre 2014 e 2024 e concluiu que cada US$ 1 investido em adaptação gera mais de US$ 10,50 em benefícios ao longo de um período de 10 anos

(Brandon *et al.*, 2025). No entanto, muitos dos efeitos positivos — como resiliência social, saúde pública ou proteção ambiental — não geram retorno financeiro direto e raramente são registrados ou valorizados nos modelos tradicionais de avaliação de investimentos. Esses benefícios sociais e externalidades são frequentemente ignorados devido a falhas de mercado e questões de equidade, o que subestima o valor real das ações de adaptação (Stoll *et al.*, 2021; Tall *et al.*, 2021).

Nesse contexto, a resiliência dos ativos de infraestrutura deve ser concebida como um atributo estratégico intrínseco aos processos de planejamento e tomada de decisão em investimentos, extrapolando a noção restrita de robustez física para englobar a capacidade dos sistemas de manterem seu desempenho funcional diante de condições climáticas extremas e de incertezas futuras. A análise conduzida por Verschuur *et al.* (2023) exemplifica de forma elucidativa a ordem de grandeza dos potenciais impactos financeiros mais amplos a partir de uma análise de ativos específicos. Ao modelarem os efeitos de paralisações induzidas por eventos climáticos em 1.320 portos distribuídos globalmente, os autores estimam perdas anuais da ordem de US$ 81 bilhões no comércio internacional e US$ 122 bilhões em atividade econômica associada — evidenciando que os impactos não se restringem ao comprometimento de ativos isolados, mas afetam de forma sistêmica a resiliência funcional das cadeias logísticas e produtivas em escala global.

Torna-se necessário, portanto, repensar o modo como os projetos de investimento em infraestrutura são estruturados, financiados e priorizados. Este capítulo busca contribuir para esse debate ao discutir os conceitos, os desafios e os caminhos para a estruturação de projetos de investimento que abordam o tema da resiliência. Em primeiro lugar, explora-se como se caracteriza um investimento em resiliência, diferenciando iniciativas que apenas protegem ativos de riscos diretos daquelas que contribuem para a capacidade adaptativa de sistemas sociais e econômicos. Em seguida, aprofundamos o conceito de resiliência sistêmica, ressaltando a importância de intervenções que promovam redundância, flexibilidade e inclusão social em escala territorial. A análise tam-

bém examina a atual lacuna de financiamento para adaptação climática, reconhecendo que, apesar da crescente atenção política e regulatória, os fluxos financeiros continuam insuficientes e desiguais — demonstrando a necessidade de uma composição entre capital público e privado para atingir o volume necessário de investimentos em adaptação. Por fim, propomos caminhos para que a estruturação de projetos de investimento utilizando metodologias internacionalmente reconhecidas, que podem acelerar os investimentos em infraestrutura capazes de fortalecer a resiliência de maneira integrada e transformadora.

## 1. DEFINIÇÕES INTERNACIONAIS SOBRE INVESTIMENTOS EM RESILIÊNCIA E ADAPTAÇÃO CLIMÁTICA

Um primeiro aspecto importante a ser aprofundado no âmbito da promoção de resiliência climática por meio da infraestrutura é precisamente a questão da taxonomia do que constitui um investimento em adaptação climática. Essas definições são fundamentais para alinhar políticas públicas, orientar decisões de financiamento e assegurar a comparabilidade e rastreabilidade dos fluxos de recursos destinados à adaptação climática. Em um contexto de crescente exposição a riscos físicos e de escassez de financiamento para a resiliência, a ausência de critérios consistentes pode levar à fragmentação de esforços e à alocação ineficiente de capital. Reconhecendo essa lacuna, fóruns multilaterais, como o G20, a OCDE e os Bancos Multilaterais de Desenvolvimento (MDBs), têm avançado na construção de diretrizes comuns, como as taxonomias verdes e os princípios para infraestrutura resiliente ao clima. Esses marcos buscam não apenas harmonizar as práticas entre países e instituições, mas também fortalecer a credibilidade dos investimentos rotulados como “resilientes”, contribuindo para maior transparência, integridade ambiental e impacto sistêmico nas estratégias de desenvolvimento sustentável.

Segundo a OCDE (2024), os investimentos (aplicação de recursos para aquisição de bens e ativos de longo prazo, por meio

de obras, máquinas, equipamentos) de adaptação devem satisfazer os três critérios seguintes: i) benefícios para a resiliência: o investimento deve aumentar a resiliência às alterações climáticas, reduzindo diretamente os riscos climáticos físicos ou apoiando a adaptação de terceiros; ii) não causar danos significativos: o investimento não deve afetar negativamente a resiliência de outras pessoas ou ecossistemas, por exemplo, aumentando os riscos enfrentados pelas comunidades vizinhas; e iii) compatível com os planos de adaptação: o investimento deve ser compatível com as estratégias nacionais ou locais, como os planos nacionais de adaptação, os contributos determinados a nível nacional ou as estratégias nacionais de redução de catástrofes. Se esses planos não existirem, ou não definirem objetivos em relação ao investimento, presume-se que um investimento é compatível. Esses critérios visam assegurar que o investimento é suscetível de ter um impacto positivo na adaptação e reduzir o risco de a medida ser ineficaz ou contraproducente (ou seja, o risco de má-adaptação).

Já os MDBs utilizam uma metodologia em três etapas para classificar um investimento como "investimento de adaptação" (World Bank, 2019). A primeira etapa consiste na contextualização do risco climático, em que o projeto deve demonstrar estar inserido em um contexto de vulnerabilidade específica às mudanças climáticas, com base em evidências científicas e análises de risco. A segunda etapa exige que o projeto apresente uma intenção explícita de adaptação, ou seja, que tenha sido desenhado deliberadamente para responder aos riscos climáticos identificados, incorporando medidas específicas para reduzir vulnerabilidades. Por fim, na terceira etapa, é necessário estabelecer um vínculo claro e racional entre as atividades financiadas e os objetivos de adaptação, assegurando que apenas os componentes diretamente relacionados à adaptação sejam contabilizados como tal. Essa abordagem busca garantir a integridade, rastreabilidade e efetividade dos recursos aplicados em ações de adaptação climática. Listas específicas de tipologias de projeto, consolidando soluções tipicamente compatíveis com tal metodologia, têm sido promovidas pelo *Climate Policy Initiative* (CPI, 2024). Esse tipo de iniciativa tem o potencial não

apenas de facilitar o rastreamento, mas também de aumentar a mobilização de financiamento privado para adaptação climática.

As definições, taxonomias e metodologias de avaliação de investimentos de adaptação também têm sido alvo de discussão em diversos grupos de trabalho do G20. O grupo de trabalho de *Redução de Riscos de Desastres* foca na prevenção e na promoção de infraestrutura resiliente, propondo métricas sistêmicas para avaliar a capacidade de resistir a desastres e mudanças climáticas, orientando investimentos. O grupo de trabalho de *Infraestrutura* discute instrumentos financeiros inovadores para mobilizar capital privado, destacando a importância de métricas que incentivem investimentos em ativos resilientes. Já o grupo de trabalho de *Meio Ambiente e Sustentabilidade Climática* trabalha na identificação de barreiras à adaptação global e na criação de abordagens sistêmicas para mensurar a eficácia das políticas de adaptação. Por fim, o grupo de trabalho de *Finanças Sustentáveis* busca integrar métricas de resiliência aos marcos financeiros, promovendo sociedades mais resilientes e inclusivas, e aumentando a credibilidade dos ativos voltados à adaptação climática.

## 2. INFRAESTRUTURA RESILIENTE VS INFRAESTRUTURA PARA RESILIÊNCIA

No contexto das diferentes taxonomias utilizadas internacionalmente para classificar investimentos em adaptação climática, para se ter uma discussão qualificada no setor de infraestrutura, é fundamental a distinção entre os conceitos de *infraestrutura resiliente* e de *infraestrutura para resiliência*.

Uma *infraestrutura resiliente* ao clima refere-se àquela que é planejada, projetada, construída e operada de forma a antecipar, se preparar e se adaptar às mudanças climáticas (OCDE, 2024). Esse tipo de infraestrutura é capaz de suportar e se recuperar rapidamente de interrupções causadas por condições climáticas em transformação ao longo de sua vida útil. O conceito abrange tanto novos ativos quanto os já existentes, que podem necessitar de readequações físicas ou de alterações em sua operação para lidar com os impactos das mudanças climáticas. Esse conceito refere-se,

portanto, a ativos de infraestrutura capazes de resistir, absorver e se recuperar de choques e estresses, como desastres naturais ou mudanças climáticas — como veremos a seguir, o foco está nos *outputs* do projeto, como pontes ou redes elétricas mais robustas.

Já o conceito de *infraestrutura para resiliência* se refere a promoção dos resultados alcançados (*outcomes*) a partir da utilização de um ativo de infraestrutura que visa aumentar a capacidade adaptativa das comunidades, cadeias de valor e sistemas frente a choques climáticos — por exemplo, infraestruturas que forneçam redundância de sistemas, ou facilitem a mitigação dos impactos climáticos em contextos de crise. Confundir esses conceitos pode levar à priorização de investimentos que não necessariamente contribuem para a resiliência sistêmica, desviando recursos de intervenções que poderiam gerar impactos mais duradouros e equitativos. Isso compromete a efetividade das políticas públicas ao focar na robustez da infraestrutura em si, em vez de considerar sua função estratégica na redução de vulnerabilidades sociais e econômicas.

Nesse contexto, faz-se necessário uma diferenciação conceitual das entregas (outputs), os resultados (*outcomes*) e efeitos de longo prazo (*impacts*) de um ativo de infraestrutura[2]:

- As entregas (*outputs*) referem-se aos produtos, bens de capital e serviços entregues no âmbito do projeto, concebidos para responder ao contexto específico de vulnerabilidade climática em que a intervenção está inserida, com o objetivo de promover a resiliência climática. Por exemplo: hectare de mangais restaurados; cidade costeira com plano de resiliência aprovado. Os *outputs* podem incluir também políticas e planos relevantes em nível regional ou nacional que estejam sendo desenvolvidos ou atualizados com o apoio do projeto. Além disso, os *outputs* podem abranger alterações institucionais, técnicas ou operacionais decorrentes da implementação, desde que contribuam diretamente para a consecução dos resultados (*outcomes*) esperados. Tais elementos podem ser reportados ao final do período de

2 Adota-se aqui a definição consensuada entre os principais Bancos de Desenvolvimento Multilateral (BID *et al.*, 2019).

execução do projeto ou, em alguns casos, de forma *ex ante* no momento de sua aprovação.

1. Os resultados (*outcomes*) referem-se aos efeitos de curto e médio prazo, previstos ou efetivamente alcançados pelo projeto, os quais podem se manifestar sob a forma de ajustes em sistemas físicos, humanos ou ambientais, bem como em benefícios econômicos associados. Por exemplo, quilômetros de costa protegidos do risco de catástrofes induzidas pelo clima, como resultado de florestas de mangue. Tais efeitos devem estar alinhados ao contexto específico de vulnerabilidade climática em que o projeto se insere, contribuindo para o fortalecimento da resiliência climática. Os *outcomes* podem ser reportados ao longo da vida útil esperada dos ativos e/ou sistemas financiados, ou ainda de forma *ex ante* no momento da aprovação do projeto. Sua verificação também pode ocorrer por meio de avaliações *ex post*. Os horizontes temporais típicos para a observação desses resultados situam-se entre um e cinco anos após a conclusão do projeto.
2. Os efeitos de longo prazo (*impacts*) referem-se aos efeitos primários e secundários de longo prazo resultantes do projeto, sejam eles diretos ou indiretos, intencionais ou não, que possam contribuir para o fortalecimento da resiliência climática em escala mais ampla, para o aumento da capacidade adaptativa e/ou para a redução da vulnerabilidade climática. Por exemplo, o aumento da resiliência das comunidades e ativos costeiros, medida por uma análise *ex post* que avalie a redução da perda de receitas provenientes de riscos relacionados com o clima. Em razão dos horizontes temporais mais extensos e das incertezas inerentes, os impactos são, em geral, inferidos ou expressos em termos qualitativos e descritivos, podendo também serem avaliados por meio de análises *ex post* de longo prazo. Os prazos para a observação desses impactos situam-se, em geral, na ordem de anos a décadas após a implementação do projeto.

## 3. RESILIÊNCIA SISTÊMICA

Uma vez compreendido os diferentes níveis de resiliência promovidos por um projeto de investimento em infraestrutura, podemos avançar para o conceito de resiliência sistêmica, ou resiliência dos sistemas. Esse conceito parte do entendimento que os sistemas de infraestrutura crítica — que incluem transporte, energia, abastecimento de água e telecomunicações — funcionam como redes interligadas que fornecem serviços essenciais a nível local, regional e global. Essa definição conceitual tem se tornado cada vez mais relevante, dada a sobreposição e consecução de choques derivados de eventos climáticos extremos que tem imposto desafios cada vez mais frequentes e de maior intensidade para as redes de infraestrutura (Allan *et al.*, 2023; Pörtner *et al.*, 2022). Esses choques expõem vulnerabilidades profundas de projeto (*design*), operação e governança desses ativos de infraestrutura, causando impactos diretos na segurança pública, estabilidade econômica e integridade ambiental.

O conceito de resiliência sistêmica, segundo a UNDRR (2022) pode ser definido como uma propriedade de um sistema de infraestrutura que emerge de forma dinâmica quando os ativos de infraestrutura são organizados de modo a garantir a provisão contínua de serviços críticos acordados — como energia, telecomunicações, mobilidade urbana, abastecimento de água e coleta de esgoto e resíduos — mesmo diante de ameaças endógenas e/ou exógenas, bem como frente à adição, modificação ou remoção de componentes da infraestrutura. O caso emblemático descrito no Quadro 1 exemplifica tal conceito de forma prática.

## Quadro 1: O canal de navegação MRGO e a resiliência sistêmica de Nova Orleans

Em 1965, foi construído um canal de navegação com 11 metros de profundidade e 200 metros de comprimento com o objetivo de conectar o Canal Industrial de Nova Orleans ao mar aberto, a leste, visando facilitar o acesso marítimo à cidade. No entanto, apenas três meses após sua conclusão, o Furacão Betsy atingiu a região, tornando-se o primeiro desastre nos Estados Unidos a ultrapassar US$ 1 bilhão em perdas econômicas – um impacto amplificado pela presença do Canal MRGO. Classificado como um furacão de categoria 3, Betsy apresentou ventos predominantes do leste, provenientes do Golfo do México, contornando as defesas instaladas ao longo do Lago Pontchartrain, que usualmente seriam suficientes para conter esse tipo de evento. Em vez disso, a tempestade direcionou uma elevação do nível das águas de 3,6 metros pelo Canal MRGO em direção ao Canal Industrial, rompendo os diques baixos recentemente expostos e provocando inundações significativas na zona leste da cidade.

Como resultado, aproximadamente 13.000 residências foram submersas por águas com profundidade de até 2,7 metros, deixando cerca de 60.000 pessoas desabrigadas e causando 58 mortes. Esse episódio evidencia como decisões de engenharia e intervenções em infraestrutura, quando desarticuladas de análises de risco climático e de impactos sistêmicos, podem amplificar a vulnerabilidade de áreas urbanas densamente povoadas, transformando obras concebidas para fins de desenvolvimento econômico em vetores de risco e desastre.

A construção do Canal MRGO constitui um exemplo emblemático de falha em priorizar a resiliência sistêmica de uma cidade – neste caso, Nova Orleans – diante de um desafio já conhecido, como a ocorrência de furacões. Embora o canal, em si, apresentasse características de infraestrutura resiliente, sua implementação comprometeu a resiliência do sistema urbano como um todo. Em contraste, a decisão de desativar o canal após a passagem do Furacão Katrina – que mais uma vez evidenciou as fragilidades sistêmicas decorrentes de sua presença – resultou no fortalecimento da resiliência sistêmica da cidade, demonstrando a importância de se considerar os efeitos integrados e interdependentes das infraestruturas nos territórios onde se inserem.

*Fonte: Shaffe et al. (2009)*

A necessidade de investimentos que promovam a resiliência sistêmica de cadeias produtivas, municípios ou regiões decorre de

que abordagens tradicionais de investimento em resiliência, que focam em intervenções isoladas, não conseguem lidar adequadamente com as falhas em cascata — por exemplo, quando uma interrupção no sistema elétrico compromete o abastecimento de água, transporte e serviços de emergência. Tal fato evidencia a necessidade de estratégias sistêmicas que considerem essas interdependências. Além disso, essas vulnerabilidades não afetam igualmente todas as comunidades: populações socioeconomicamente desfavorecidas, especialmente no Sul Global, enfrentam impactos desproporcionais devido a desigualdades estruturais e distribuição regressiva de acesso a serviços básicos de infraestrutura (Aberra *et al.*, 2024; Bhargava & Bhargava, 2023; Benevenuto & Caulfield, 2019).

Para enfrentar essas complexidades, o conceito de resiliência sistêmica tem ganhado destaque como um quadro fundamental para compreender e gerenciar infraestruturas interconectadas. Essa abordagem enfatiza a capacidade das redes de infraestrutura de absorver, adaptar-se e recuperar-se de perturbações mantendo suas funções essenciais, reconhecendo que falhas em um setor podem desencadear efeitos em cascata em outros (Linkov *et al.*, 2014; Sathurshan *et al.*, 2022). A resiliência sistêmica desafia o planejamento tradicional fragmentado, propondo uma perspectiva de "sistema de sistemas" que é crucial diante dos riscos climáticos compostos, do envelhecimento das infraestruturas e da crescente dependência das tecnologias digitais (Francis & Bekera, 2014). A aplicação da resiliência sistêmica aprimora a governança de infraestrutura ao alinhar design, investimento e operação com ambientes de risco complexos e multirriscos, indo além da proteção de ativos isolados. Ela reconhece que falhas emergem não apenas de choques externos, mas também de fragilidades estruturais e dependências funcionais entre sistemas, como exemplificado pela interrupção da rede elétrica que afeta serviços de água e transporte (Hickford *et al.*, 2018). Ademais, métricas robustas de resiliência sistêmica são essenciais para avaliar vulnerabilidades, orientar investimentos sustentáveis e inclusivos e promover decisões baseadas em dados, catalisando aportes públicos e privados em infraestrutura resiliente ao clima (OECD, 2024).

## 4. A LACUNA DE INVESTIMENTOS EM ADAPTAÇÃO E RESILIÊNCIA CLIMÁTICA

A demanda global por financiamento voltado à adaptação às mudanças climáticas supera amplamente os fluxos financeiros atualmente mobilizados pelos setores público e privado. O relatório *Global Landscape of Climate Finance* 2023 estima que os países em desenvolvimento precisarão de US$ 212 bilhões por ano até 2030 para financiamento da adaptação, aumentando para US$ 239 bilhões por ano entre 2031 e 2050. O *UNEP Adaptation Gap Report* 2023 sugere uma faixa semelhante, entre US$ 130–415 bilhões anuais nesta década, com aumento significativo até 2050. A dificuldade na mobilização desse capital amplia a exposição de populações e ativos aos impactos adversos decorrentes do agravamento do cenário climático. A Tabela 1 demonstra, em uma perspectiva comparativa, a ordem de grandeza dos investimentos estimados para adaptação no setor de infraestrutura em relação a demais setores econômicos para países em desenvolvimento.

**Tabela 1:** Custos setoriais de adaptação *(Fonte: CPI, 2023; UNEP, 2023)*

| Setor | Tipo de Custo | Custo Estimado (países em desenvolvimento) |
|---|---|---|
| **Infraestrutura** | Resiliência nos setores de construção civil, energia e transportes | USD 56 bilhões/ano, com aumento significativo até 2050 |
| **Zonas costeiras** | Proteção costeira e recuperação de praias | USD 56 bilhões/ano (2010–2050) |
| **Inundações fluviais** | Proteção contra inundações fluviais | USD 54 bilhões/ano |
| **Alerta precoce e proteção social** | Sistemas universais de alerta precoce | USD 16 bilhões/ano |
| **Agricultura** | Redução do impacto climático na fome crônica | USD 16 bilhões/ano |
| **Saúde** | Controle de doenças relacionadas ao clima e mortalidade | USD 11 bilhões/ano até a década de 2050 |

As informações sobre o financiamento público nacional para adaptação às mudanças climáticas, bem como do setor privado,

ainda são escassas e pouco transparentes. No entanto, é possível observar uma diversidade de fontes e instrumentos financeiros envolvidos no financiamento climático de adaptação. Governos, bancos multilaterais, instituições financeiras privadas e indivíduos contribuem com recursos por meio de doações, empréstimos concessionais, investimentos de mercado e capital próprio.

Entretanto, dados do relatório Citi GPS (2023) indicam que o financiamento de investimentos em adaptação a nível mundial ainda é fortemente concentrado em fontes públicas, representando 97% dos recursos destinados à adaptação entre 2021 e 2022. Isso reflete a dificuldade que muitas empresas enfrentam para perceber a utilidade ou a rentabilidade dos investimentos em adaptação. Essas informações são fundamentais para qualificar a precificação do risco climático e, assim, facilitar a mobilização de financiamento privado para adaptação. A tomada de decisão empresarial depende de uma avaliação clara dos impactos financeiros de eventos climáticos — como interrupções operacionais ou perda de receita —, mas a variabilidade local e a escassez de dados dificultam estimativas precisas. Sem uma mensuração adequada, investidores privados tendem a evitar projetos de adaptação, agravando os riscos futuros. Além disso, torna-se difícil estimar os custos da inação, já que os benefícios de intervenções muitas vezes só se manifestam após a ocorrência de eventos extremos (OECD, 2023a).

Dados recentes indicam que o financiamento para adaptação climática entre 2021 e 2022 representou um total de 68 bilhões de dólares em média anual durante o período analisado (Wignarajah *et al.*, 2023). Apesar de esse valor ter mais que duplicado entre 2018 e 2022, os montantes de financiamento de adaptação ainda são significativamente menores do que os recursos destinados à mitigação (US$ 1.171 bilhões). O setor público continuou sendo a principal fonte desses fluxos (92% em 2022), predominando nos setores de infraestrutura hídrica e esgotamento sanitário (88%) e AFOLU (agricultura, florestas e uso da terra). De toda forma, o volume relativamente baixo de financiamento para adaptação em comparação com a mitigação sugere a necessidade de reequilibrar as prioridades globais.

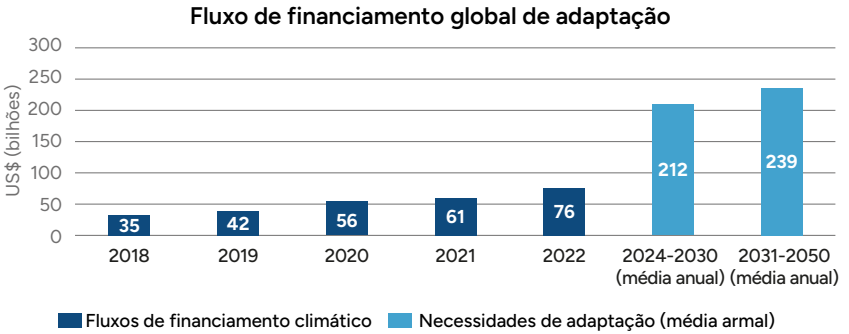



**Figura 2:** Fluxos de financiamento global de adaptação - Histórico vs Necessidade futura *(Fonte: Wignarajah et al., 2023)*

Em um cenário de restrição fiscal crescente, torna-se evidente que, para atingir tais incrementos nos fluxos financeiros para adaptação, uma composição entre investimentos públicos e privados é necessária. No entanto, tais investimentos frequentemente enfrentam obstáculos significativos para serem alocados em projetos de adaptação climática, em grande parte devido à escassez de projetos que atendam aos requisitos mínimos de viabilidade técnica, financeira, jurídica e ambiental. Essa lacuna configura um dos principais entraves à mobilização de capital em escala compatível com os desafios climáticos, sendo amplamente reconhecida como um dos fatores estruturais que limitam o avanço de investimentos em resiliência. O Fundo Monetário Internacional (2024) ressalta que a eficiência dos investimentos públicos, especialmente em países de baixa renda, está diretamente condicionada à qualidade do ciclo do projeto, incluindo etapas críticas como a preparação, a seleção e a gestão dos empreendimentos. Embora o número de projetos orientados ao setor privado tenha crescido de forma expressiva nas últimas décadas, iniciativas que incorporam componentes robustos de adaptação climática ainda representam uma fração minoritária da carteira total de projetos estruturados (CPI, 2015). A esse contexto, somam-se as incertezas inerentes à avaliação de riscos climáticos e à mensuração dos benefícios da resiliência, que dificultam a adequada precificação dos ativos e a viabilização de instrumentos financeiros inovadores. Nesse sentido, o fortalecimento

das capacidades institucionais e a modernização dos processos de estruturação de projetos despontam como elementos centrais para destravar fluxos de investimento e catalisar intervenções à altura da urgência imposta pelas mudanças climáticas.

## 5. MAINSTREAMING RESILIÊNCIA NA ESTRUTURAÇÃO DE PROJETOS DE INVESTIMENTO

Para alcançar níveis compatíveis de fluxos financeiros necessários para a adaptação no setor de infraestrutura, é essencial ampliar a escala dos investimentos sem comprometer a qualidade dos projetos. Nesse sentido, o aprimoramento dos processos de estruturação de projetos de infraestrutura representa uma alavanca estratégica para acelerar a execução e assegurar a qualidade dos investimentos voltados à promoção da resiliência sistêmica.

A estruturação de projetos de investimento refere-se à condução de estudos de viabilidade e à elaboração da documentação técnica, econômico-financeira, jurídica e gerencial necessária para a licitação de projetos em setores de infraestrutura econômica e social. Ao longo da última década, observa-se no contexto brasileiro um expressivo avanço na modernização dos processos de governança, avaliação e estruturação de projetos de investimentos em infraestrutura (Moraes *et al.*, 2024; OECD, 2023b). Um dos pontos de destaque nesse processo foi a adoção do Modelo de Cinco Dimensões (M5D), inspirado e adaptado do *Five Case Model* britânico, como metodologia de estruturação de projetos de investimento como referencial para infraestrutura nacional e subnacional (Moraes *et al*, 2024; Brasil, 2022).

O M5D é metodologia recomendada internacionalmente (G20, 2017; HM Treasury, 2022) e progressivamente referendada também a nível nacional por instituições como o Tribunal de Contas da União, o Comitê Interministerial de Governança, a Secretaria Especial do Programa de Parcerias de Investimentos da Casa Civil, entre outras entidades públicas nas esferas federal, estadual e municipal (Turolla *et al.*, 2025). Notadamente, o M5D oferece uma

estrutura analítica robusta que permite incorporar, de forma sistemática, os objetivos de resiliência climática nas distintas esferas de análise — estratégica, econômica, financeira, comercial e gerencial — de projetos de investimento (HM Treasury, 2022).

Ao introduzir a perspectiva da resiliência na preparação das diversas fases do ciclo de vida do projeto, o modelo possibilita a identificação antecipada de riscos e oportunidades associados às mudanças climáticas, promovendo avaliações mais abrangentes do valor socioeconômico de longo prazo, incluindo os chamados *dividendos de resiliência* (WRI, 2025). A exigência de critérios vinculados à resiliência climática favorece o alinhamento dos investimentos em infraestrutura às metas de adaptação, aos marcos regulatórios vigentes e às expectativas de distintos stakeholders, contribuindo para a implementação de ativos públicos mais robustos e preparados para os desafios futuros.

A seguir são apresentados elementos que demonstram como a promoção da resiliência climática pode ser fortalecida em cada uma das cinco dimensões recomendadas por tal modelo para estruturação de um projeto.

## Dimensão Estratégica: Alinhamento com Políticas de Adaptação Climática

Diversos eventos recentes, como as inundações ocorridas no estado do Rio Grande do Sul (2023), em Pernambuco (2022) e na Bahia (2021), entre outras catástrofes climáticas, evidenciam que grande parte da infraestrutura brasileira ainda não incorpora, de forma sistemática, a consideração dos riscos climáticos em seu planejamento estratégico. A carência de alinhamento entre as metas individuais de cada projeto e as diretrizes de adaptação estabelecidas em níveis local, regional e nacional resulta em ações fragmentadas e na ausência de coordenação entre as intervenções setoriais (OECD, 2023a). A incorporação da resiliência climática começa na Dimensão Estratégica, onde se define a justificativa do projeto e sua articulação com os objetivos mais amplos de políticas públicas. Para assegurar a integração da resiliência climática desde as fases iniciais da concepção do projeto, seus objetivos devem estar expli-

citamente alinhados com as estratégias nacionais (como os Estudos do *Adaptavias* do Ministério dos Transportes) e subnacionais (como os Planos Diretores de Drenagem), promovendo coerência com as políticas públicas de adaptação vigentes. Esse alinhamento assegura que os investimentos em infraestrutura não apenas atendam às necessidades atuais de serviços, mas também estejam preparados para enfrentar incertezas futuras relacionadas ao clima.

## Dimensão Econômica: Avaliação da resiliência nas diversas alternativas

A dimensão econômica oferece uma base rigorosa para avaliar a relação socioeconômica de custo-benefício do projeto, sendo essencial para verificar quantitativamente os dividendos de resiliência (WRI, 2025) gerados na avaliação de cada alternativa. Especificamente para endereçar a questão dos riscos climáticos nessa etapa, o governo federal, em parceria com a Agência de Cooperação Alemã (GIZ), publicou o anexo de *Riscos Climáticos do Guia Geral de Análise Socioeconômica de Custo-Benefício de Projetos de Investimento em Infraestrutura* (Brasil, 2022b). Esse documento estabelece uma metodologia para incorporar os riscos associados às mudanças climáticas na avaliação de projetos de qualquer setor de infraestrutura. A metodologia é estruturada em três etapas principais: inicialmente, realiza-se uma triagem para identificar se o projeto está exposto a riscos climáticos relevantes, como aumento do nível do mar, secas ou enchentes. Caso seja identificada exposição, segue-se para uma análise detalhada dos impactos potenciais sobre custos e benefícios do projeto, considerando tanto riscos crônicos (mudanças graduais) quanto agudos (eventos extremos). Por fim, os resultados dessa avaliação são integrados ao processo de tomada de decisão, permitindo comparar cenários com e sem adaptação e avaliar a viabilidade socioeconômica das intervenções propostas. A análise da dimensão econômica, incorporando tal ferramenta de avaliação dos riscos climáticos, proporciona que os elementos de adaptação deixem de ser vistos como custos adicionais e passem a ser reconhecidos como componentes fundamentais para a eficiência e sustentabilidade econômica ao longo do ciclo de vida do projeto.

## Dimensão Financeira: Viabilizando o Financiamento de Projetos de Adaptação

No Dimensão Financeira, avaliam-se a viabilidade financeira, as fontes de financiamento e os riscos financeiros do projeto — inclusive aqueles relacionados à variabilidade e às mudanças climáticas. A resiliência pode ser incorporada considerando custos de ciclo de vida que contemplem manutenção, reparos e operação sob diferentes cenários climáticos. Os mecanismos de financiamento de infraestrutura de adaptação climática por meio de Parcerias Público-Privadas (PPPs) destacam-se como uma alternativa relevante para viabilizar grandes projetos que exigem investimentos robustos e compartilhamento de riscos. Diversos projetos de gestão de riscos de enchentes e resiliência costeira, como o *Fargo-Moorhead River Diversion Project* (EUA), *Broadland Flood Protection* (Reino Unido) e *Mission Rock em San Francisco* (EUA), têm sido financiados por PPPs, que incluem remunerações por meio de pagamentos de disponibilidade ("*availability payment*"), contratos de desempenho, ou captura de valor imobiliário, a depender do modelo adotado (World Bank, 2025). Garantir a sustentabilidade financeira em um futuro de mudanças climáticas exige que os riscos físicos associados a tais novos cenários climáticos sejam precificados desde o início, permitindo um planejamento financeiro mais robusto e previsível.

## Dimensão Comercial: Modelos de contratação e market sounding

A Dimensão Comercial analisa os mecanismos de contratação e execução, oferecendo uma oportunidade para integrar a resiliência climática por meio do engajamento com o mercado e da estruturação contratual. A resiliência pode ser promovida, por exemplo, por meio de contratos de desempenho que recompensem resultados relacionados à adaptação climática, como a continuidade dos serviços durante eventos extremos ou a eficiência energética sob condições climáticas adversas. O engajamento antecipado com fornecedores e atores do setor privado também pode revelar soluções tecnológicas e inovações que apoiem a adaptação. Além disso, processos de consulta ao mercado podem avaliar a viabilidade e

a atratividade de entregar infraestrutura resiliente nas condições atuais, identificando eventuais lacunas de capacidade ou incentivos necessários para alinhar o setor privado aos objetivos de resiliência.

### Dimensão Gerencial: Governança, gestão dos riscos e avaliação dos projetos

A Dimensão Gerencial trata da governança, planejamento de execução e gestão de riscos do projeto, sendo fundamental para operacionalizar a resiliência climática. Isso inclui o estabelecimento de responsabilidades institucionais claras para a implementação das medidas de adaptação, o monitoramento de indicadores de desempenho climático e a adoção de processos de gestão adaptativa ao longo de todo o ciclo do projeto. A resiliência deve estar presente nos registros de risco e nos planos de contingência, com protocolos definidos para responder a eventos climáticos adversos. Iniciativas de capacitação voltadas às equipes de projeto e aos órgãos executores também são fundamentais para assegurar que as medidas de resiliência sejam efetivamente implementadas. Além disso, mecanismos de aprendizado contínuo — por meio de monitoramento, avaliação pós-implementação e atualizações baseadas em novos dados climáticos — devem ser incorporados, para garantir a melhoria constante das ações de adaptação.

## 6. CONCLUSÃO

A análise desenvolvida ao longo deste capítulo evidencia que a incorporação da resiliência climática nos investimentos em infraestrutura é não apenas uma necessidade técnica, mas um imperativo estratégico para o desenvolvimento sustentável. As evidências demonstram que a intensificação dos riscos físicos relacionados às mudanças climáticas representa uma ameaça direta à funcionalidade e ao valor econômico dos ativos de infraestrutura, ao mesmo tempo em que amplia desigualdades sociais e territoriais. A resposta a esse desafio exige uma transformação profunda na forma como governos, investidores e instituições financeiras concebem, planejam e executam projetos — passando de uma lógica reativa de

proteção pontual para uma abordagem proativa de fortalecimento da resiliência sistêmica.

Nesse sentido, distinguir entre *infraestrutura resiliente* e *infraestrutura para resiliência* revela-se crucial para orientar investimentos que não apenas resistam a eventos climáticos, mas que também ampliem a capacidade adaptativa de comunidades e sistemas produtivos. O foco em resultados (*outcomes*) e impactos de longo prazo (*impacts*) reforça a necessidade de mensurar a efetividade dos investimentos sob uma ótica socioeconômica ampliada, que inclua externalidades e equidade na distribuição dos custos e benefícios. Essa visão sistêmica é o que permite compreender a infraestrutura como vetor de transformação estrutural, capaz de reduzir vulnerabilidades, impulsionar produtividade e promover coesão social diante de um clima em rápida mutação.

Ao mesmo tempo, a lacuna persistente no financiamento de adaptação reflete não apenas a escassez de recursos, mas a dificuldade de estruturar projetos bancáveis, rastreáveis e alinhados às taxonomias e metodologias internacionais. O fortalecimento institucional e a qualificação técnica dos processos de estruturação tornam-se, portanto, fatores determinantes para destravar o investimento em escala. Metodologias como o M5D oferecem um caminho concreto para integrar critérios de resiliência climática em todas as etapas do ciclo de projeto — desde a justificativa estratégica até a governança e avaliação *ex post* — assegurando que a resiliência seja tratada como eixo transversal da política de investimentos públicos e parcerias público-privadas.

Por fim, construir uma carteira robusta de projetos de infraestrutura adaptados ao clima requer uma nova geração de instrumentos financeiros, regulatórios e institucionais que promovam sinergias entre capital público e privado e reconheçam os "dividendos de resiliência" como parte integrante do retorno do investimento. Ao articular metodologias consistentes, critérios de priorização claros e métricas de impacto, os tomadores de decisões poderão priorizar investimentos mais racionais e eficientes, reduzindo custos futuros e ampliando benefícios coletivos.

# REFERÊNCIAS


Aberra, F., Harrod, C., Mays, M., & Stevenson, H. (2024, May). **The Ethics of Disaster Resilient Infrastructure Maintenance and Social Equity**. *In* 2024 Systems and Information Engineering Design Symposium (SIEDS) (pp. 466-471). IEEE.

Banco Interamericano de Desenvolvimento (BID), African Development Bank, Asian Development Bank, Asian Infrastructure Investment Bank, European Bank for Reconstruction and Development, European Investment Bank, International Development Finance Club, & Islamic Development Bank (2019). **A Framework and Principles for Climate Resilience Metrics in Financing Operations**. Disponível em: https://doi.org/10.18235/0002040

Benevenuto, R., & Caulfield, B. (2019). **Poverty and transport in the global south: An overview**. Transport Policy, 79, 115-124.

Bhargava, R., & Bhargava, M. (2023). **The climate crisis disproportionately hits the poor. How can we protect them**. *In* World Economic Forum

Blanc-Brude, F., A. Gupta., J.Lee, F. Nugier & T. Whittaker, "**The cost of international sanctions to investors in Russia's airports**" (March 2022). Disponível em: https://edhecinfraprivateassets.com/paper/the-cost-of-international-sanctions-to-investors-in-russias-airports/

Brandon, C., Kratzer, B., Aggarwal, A. and Heubaum, H. (2025). World Resources Institute. **Working paper: Strengthening the investment case for climate adaptation: A triple dividend approach**. DOI https://doi.org/10.46830/wriwp.25.00019

Brasil, 2022a. **Estruturação de propostas de investimento em infraestrutura: modelo de cinco dimensões**. Brasília. Disponível em: https://www.gov.br/mdic/pt-br/assuntos/choque-de-investimento-privado/modelo-de-cinco-dimensoes/guia-modelo-de-cinco-dimensoes.pdf

Brasil, 2022b. **Anexo II – Riscos Climáticos**. Anexo do Guia Geral de Análise Socioeconômica de Custo-Benefício de Projetos de Investimento em Infraestutura - Guia ACB. Disponível

em: https://www.gov.br/mdic/pt-br/assuntos/choque-de-investimento-privado/avaliacao-socioeconomica-de-custo-beneficio-1/anexo-riscos-climaticos-1.pdf

Climate Policy Initiative – CPI. (2024). **Tracking and Mobilizing Private Sector Climate Adaptation Finance**. Disponível em: https://www.climatepolicyinitiative.org/wp-content/uploads/2024/09/Tracking-and-Mobilizing-Private-Sector-Climate-Adaptation-Finance-2024.pdf

Climate Policy Initiative. (2023). **Global landscape of climate finance 2023**. Disponível em: https://www.climatepolicyinitiative.org/pt-br/publication/global-landscape-of-climate-finance-2023/

Climate Policy Initiative. (2023). **State and trends in climate adaptation finance**. Disponível em: https://gca.org/wp-content/uploads/2023/12/State-and-Trends-in-Climate-Adaptation-Finance-2023_WEB.pdf

Climate Policy Initiative (2015). **Emerging solutions to drive private investment in climate resilience**. Disponível em: https://climatepolicyinitiative.org/wp-content/uploads/2015/06/Finance-for-Climate-Resilience.pdf

Confederação Nacional dos Municípios. 2025. **Estudo Panorama dos Desastres no Brasil – 2013 a 2024**. Disponível em: https://cnm.org.br/storage/biblioteca/2025/Estudos_Tecnicos/ET_DEFCIVIVL_05-2025_Panorama_dos_Desastres_no_Brasil_2013_a_2024.pdf

Francis, R., & Bekera, B. (2014). **A metric and frameworks for resilience analysis of engineered and infrastructure systems**. Reliability engineering & system safety, 121, 90-103.

Fundo Monetário Internacional (2024). **Working paper: Public Investment Management Bottlenecks in Low-income Countries**. Disponível em: https://www.imf.org/-/media/Files/Publications/WP/2024/English/wpiea2024232-print-pdf.ashx

Linkov, I., Bridges, T., Creutzig, F., Decker, J., Fox-Lent, C., Kröger, W., Lambert, J. H., Levermann, A., Montreuil, B., Nathwani, J., Nyer, R., Renn, O., Scharte, B., Scheffler, A., Schreurs, M., & Thiel-Clemen, T. (2014). **Changing the resilience paradigm. Nature Climate Change**, 4(6), 407-409. https://doi.org/10.1038/nclimate2227

Marcelo, Darwin and Frederic Blanc-Brude, "**It's Getting Physical**" SSRN (2023). http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.4784951

Moraes, R., Peci, A. Pompermayer, F. M, Lucas, L. F. C., Rech, T., Marinho, S. (2024). **Indicadores quantitativos da OCDE e o Brasil: governança pública**. Rio de Janeiro: Ipea: CEPAL, 2024. v. 3. ISBN: 978-65-5635-079-0. DOI: http://dx.doi.org/10.38116/9786556350790

G20 (2017). G20 **Principles for the Infrastructure Project Preparation Phase Prepared by the Infrastructure Working Group**. Disponível em: https://cdn.gihub.org/umbraco/media/2570/g20-principles-for-the-project-prep-phase.pdf

HM Trasury, 2023. **Infrastructure and Projects Authority – Infrastructure Busines Case: International Guidance**. Disponível em: https://assets.publishing.service.gov.uk/media/623b24e6e90e07799f0c7c3e/Infrastructure_Business_Case_International_Guidance.pdf

OECD (2024), **Infrastructure for a Climate-Resilient Future, OECD Publishing**, Paris. Disponível em: https://doi.org/10.1787/a74a45b0-en

OECD (2023a). **Green Finance and Investment Scaling Up Adaptation Finance in Developing Countries CHALLENGES AND OPPORTUNITIES FOR INTERNATIONAL PROVIDERS**. Disponível em: https://www.oecd.org/content/dam/oecd/en/publications/reports/2023/11/scaling-up-adaptation-finance-in-developing-countries_4f4b0a0a/b0878862-en.pdf

OECD (2023b). **Economic Surveys: Brazil 2023**. Disponível em: https://www.oecd.org/en/publications/oecd-economic-surveys-brazil-2023_a2d6acac-en.html

Sathurshan, M., Saja, A., Thamboo, J., Haraguchi, M., & Navaratnam, S. (2022). **Resilience of critical infrastructure systems: a systematic literature review of measurement frameworks**. Infrastructures, 7(5), 67. Disponível em: https://www.mdpi.com/2412-3811/7/5/67

Shaffer, Gary P., John W. Day, Sarah Mack, G. Paul Kemp, Ivor van Heerden, Michael A. Poirrier, Karen A. Westphal, *et al.* "**The MRGO Navigation Project: A Massive Human-Induced Environmental, Economic, and Storm Disaster**." Journal of Coastal Research, 2009, 206–24. http://www.jstor.org/stable/25737481

Turolla, F., Benevenuto, R., Botassio, D, Igrejas, R. (2023) **Working paper: Novos protocolos na estruturação de projetos de infraestrutura no Brasil**. PSP Hub Infrastructure and Urbanism Studies. Disponível em: https://psphub.org/wp-content/uploads/2023/12/2023_12_02-PSP_Hub-WP004-Estruturacao_projetos_Brasil.pdf

United Nations Office for Disaster Risk Reduction - UNDRR (2022). **Principles for resilient infrastructure**. Disponível em: https://www.undrr.org/quick/70250

Verschuur, Jasper, Elco E. Koks, and Jim W. Hall, "**Systemic risks from climate-related disruptions at ports**," Nature Climate Change, 13, no. 8 (2023): 804-806. https://doi.org/10.1038/s41558-023-01754-w

UNEP (2023). Underfinanced. Underprepared. **Adaptation Finance Gap Update 2023 Inadequate investment and planning on climate adaptation leaves world exposed**. Disponível em: https://unfccc.int/sites/default/files/resource/Finance_Gap_Update.pdf

Wignarajah, D., Richmond, M., Stout, S., Martinez, G., Schell-Smith, K., & Padmanabhi, R. (2023). State and Trends in Climate Adaptation Finance 2023. **Climate Policy Initiative, Global Center on Adaptation Report**. Disponível em https://www.climatepolicyinitiative.org/wp-content/uploads/2023/12/State-and-Trends-in-Climate-Adaptation-Finance-2023_.pdf

World Bank, 2019. **Joint methodology for tracking climate change adaptation finance**. Disponível em: https://thedocs.worldbank.org/en/doc/20cd787e947dbf44598741469538a4ab-0020012022/original/20220242-mdbs-joint-methodology-climate-change-adaptation-finance-en.pdf

World Bank, 2025. **Financing Climate Adaptation Nature-based Infrastructure**. Disponível em: https://documents1.worldbank.org/curated/en/099050725135521570/pdf/P501013-299da78d-86cc-4f74-a095-cde17655875a.pdf

World Resources Institue – WRI (2025). **Working paper: Strengthening the Investment Case for Climate Adaptation: A Triple Dividend Approach**. Disponível em: https://doi.org/10.46830/wriwp.25.00019

2

# INVESTMENTS IN INFRASTRUCTURE AND CLIMATE RESILIENCE: CONCEPTS, CHALLENGES AND PATHS

RODOLFO GOMES BEVEVENUTO, PHD

## ABSTRACT

This chapter analyzes the growing impacts of climate change on infrastructure systems, highlighting how chronic risks and extreme events can compromise the integrity, functionality, and longevity of assets, generating significant economic and social consequences. International criteria for classifying climate adaptation financing are presented, with special attention to the conceptual distinctions between resilient infrastructure and infrastructure for resilience. The relevance of interventions that favor systemic resilience, going beyond the punctual protection of assets, is emphasized. The text also highlights the persistent financing gap for adaptation in various infrastructure sectors, in the face of growing demands and obstacles to capital mobilization. Finally, tools for improving project preparation processes based on the Five Case Model are discussed, highlighting its potential as a strategic lever to increase the volume and ensure the quality of investments in infrastructure aimed at building more resilient systems.

**Keywords:**

Adaptation finance; systemic resilience; project preparation; Five Case Model

## INTRODUCTION

Climate change is a growing structural risk for infrastructure systems. Rising sea levels, more extreme hydrometeorological events (such as floods, heat waves, and storms), and gradually higher global temperatures directly impact the physical integrity, durability, and functionality of infrastructure assets across all sectors. These factors not only increase operation and maintenance costs, but also compromise the reliability and continuity of the services promoted by such assets, with direct implications on urban mobility, supply logistics, regional integration and the performance of production chains. This context requires an analysis of the main related concepts, challenges and possible strategies for increasing investments in infrastructure that promote greater climate resilience, whether public or private.

Projections based on current climate scenarios indicate that, by 2050, the net asset value (NAV), of an infrastructure asset[1] could be reduced on average by 4.4%, reaching losses of up to 26.7% in the most adverse scenarios, as a result of the intensification of physical risks related to climate change (Darwin and Blanc-Brude, 2023). The analysis is based on a representative sample of 700 companies for which asset-level climate risk estimates are available on EDHECInfra's *InfraMetrics* platform. The estimated financial loss for the infrastructure asset portfolio was calculated using a probabilistic model presented by Blanc-Brude and Gupta (2022), which consists of creating simulated portfolios, mimicking how real investors apply resources over time. Figure 1 highlights the transportation sector, which can reach 98% of the value of assets in more extreme climate change scenarios. In addition to the financial loss suffered by the managers of these assets, such losses can compromise territorial connectivity, logistical efficiency, and accessibility for vulnerable populations, widening socio-spatial inequalities.

1 The market value of the asset minus all its associated liabilities constituting a metric to assess the financial health of the asset.

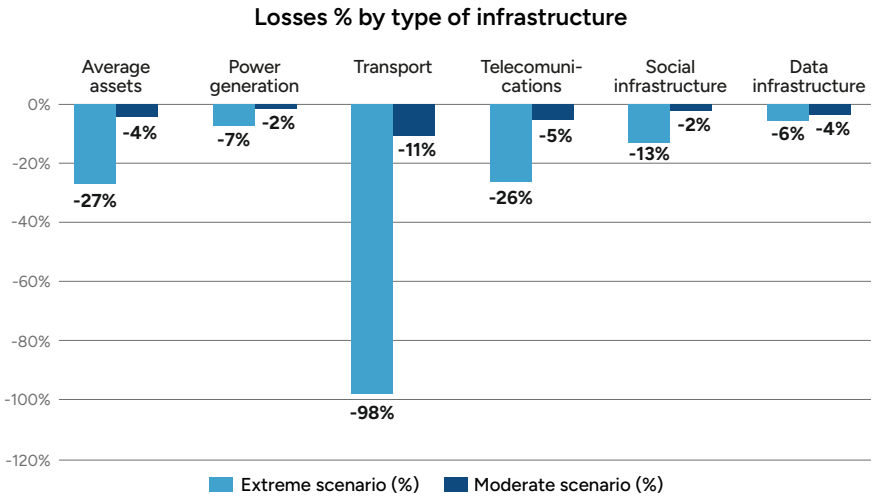



**Figure I:** Potential losses of the net value of infrastructure assets due **to the physical risk of climate change by scenario to 2050**
*(Source: Darwin and Blanc-Brude, 2023)*

It is important to mention that well-known financial metrics, such as *value at risk*, although increasingly used by private investors to assess risk-adjusted returns, still fail to capture a critical dimension: the broader economic, social, and environmental impacts that can compromise the functionality and benefits of these assets to society. This is due to the difficulty of quantifying the non-financial benefits of adaptation. Some of these impacts can be estimated more broadly based on past experiences. For example, in a recent report produced for the G20, the *World Resources Institute* evaluated 320 adaptation investments in agriculture, water, infrastructure, and health in 12 countries between 2014 and 2024 and concluded that every US$1 invested in adaptation generates more than US$10.50 in benefits over a 10-year period (Brandon *et al.*, 2025). However, many of the positive effects—such as social resilience, public health, or environmental protection—do not generate direct financial returns and are rarely recorded or valued in traditional investment valuation models. These social benefits and externalities are often ignored due to market failures and equity issues,

which underestimates the real value of adaptation actions (Stoll *et al.*, 2021; Tall *et al.*, 2021).

In this context, the resilience of infrastructure assets should be conceived as a strategic attribute, intrinsic to the planning and decision-making processes in investments, extrapolating the restricted notion of physical robustness to encompass the ability of systems to maintain their functional performance in the face of extreme weather conditions and future uncertainties. The analysis conducted by Verschuur *et al.* (2023) exemplifies in an insightful manner the order of magnitude of the potential broader financial impacts from an analysis of specific assets. By modeling the effects of weather-induced shutdowns in 1,320 ports distributed globally, the authors estimate annual losses of around US$ 81 billion in international trade and US$ 122 billion in associated economic activity—showing that the impacts are not restricted to the impairment of isolated assets, but systematically affect the functional resilience of logistics and production chains on a global scale.

It is therefore necessary to rethink the way infrastructure investment projects are prepared, financed and prioritized. This chapter seeks to contribute to this debate by discussing the concepts, challenges, and paths for structuring investment projects that address the theme of resilience. First, we explore how an investment in resilience is characterized, differentiating initiatives that only protect assets from direct risks from those that contribute to the adaptive capacity of social and economic systems. Next, we delve into the concept of systemic resilience, emphasizing the importance of interventions that promote redundancy, flexibility, and social inclusion on a territorial scale. The analysis also examines the current climate adaptation finance gap, recognizing that despite growing policy and regulatory attention, financial flows remain insufficient and uneven—demonstrating the need for a composition between public and private capital to achieve the necessary volume of adaptation investments. Finally, we propose ways for structuring investment projects using internationally recognized methodologies that can accelerate investments in infrastructure capable of strengthening resilience in an integrated and transformative way.

## 1. INTERNATIONAL DEFINITIONS ON INVESTMENTS IN CLIMATE RESILIENCE AND ADAPTATION

An important first aspect to be explored in the context of promoting climate resilience through infrastructure is precisely the taxonomy of what constitutes an investment in climate adaptation. These definitions are essential to align public policies, guide financing decisions, and ensure the comparability and traceability of the flows of resources destined to climate adaptation. In a context of increasing exposure to physical risks and a shortage of resilience funding, the absence of consistent criteria can lead to fragmentation of efforts and inefficient allocation of capital. Recognizing this gap, multilateral forums, such as the G20, the OECD, and the Multilateral Development Banks (MDBs), have made progress in building common guidelines, such as green taxonomies and principles for climate-resilient infrastructure. These frameworks seek not only to harmonize practices across countries and institutions, but also to strengthen the credibility of investments labeled as "resilient," contributing to greater transparency, environmental integrity, and systemic impact on sustainable development strategies.

According to OECD (2024), adaptation investments (application of resources for the acquisition of long-term goods and assets, through works, machinery, equipment) must meet the following three criteria: i) benefits for resilience: the investment must increase resilience to climate change, directly reducing climate risks physical or supporting the adaptation of others; (ii) do no significant harm: the investment must not negatively affect the resilience of other people or ecosystems, for example by increasing the risks faced by neighboring communities; and (iii) compatible with adaptation plans: the investment shall be compatible with national or local strategies, such as national adaptation plans, nationally determined contributions or national disaster reduction strategies. If such plans do not exist, or do not set objectives in relation to the investment, an investment is presumed to be compatible. These criteria aim to ensure that the investment is likely

to have a positive impact on adaptation and to reduce the risk that the measure will be ineffective or counterproductive (i.e. the risk of maladaptation).

MDBs, on the other hand, use a three-step methodology to classify an investment as an "adaptation investment" (World Bank, 2019). The first stage consists of the contextualization of climate risk, in which the project must demonstrate that it is inserted in a context of specific vulnerability to climate change, based on scientific evidence and risk analysis. The second stage requires that the project has an explicit intention to adapt, that is, that it has been deliberately designed to respond to the identified climate risks , incorporating specific measures to reduce vulnerabilities. Finally, in the third step, it is necessary to establish a clear and rational link between the funded activities and the adaptation objectives, ensuring that only the components directly related to adaptation are counted as such. This approach seeks to ensure the integrity, traceability, and effectiveness of the resources applied in climate adaptation actions. Specific lists of project typologies, consolidating solutions typically compatible with such a methodology have been promoted by the *Climate Policy Initiative* (CPI, 2024). This type of initiative has the potential not only to facilitate tracking, but also to increase the mobilization of private finance for climate adaptation.

The definitions, taxonomies and methodologies for assessing adaptation investments have also been discussed in several G20 working groups. The *Disaster Risk Reduction* working group focuses on preventing and promoting resilient infrastructure, proposing systemic metrics to assess the capacity to withstand disasters and climate change, guiding investments. The *Infrastructure* working group discusses innovative financial instruments to mobilize private capital, highlighting the importance of metrics that encourage investments in resilient assets. The *Environment and Climate Sustainability* working group works on identifying barriers to global adaptation and creating systemic approaches to measure the effectiveness of adaptation policies. Finally, the *Sustainable Finance* working group seeks to integrate resilience metrics into financial

frameworks, promoting more resilient and inclusive societies, and increasing the credibility of assets aimed at climate adaptation.

## 2. RESILIENT INFRASTRUCTURE VS INFRASTRUCTURE FOR RESILIENCE

In the context of the different taxonomies used internationally to classify investments in climate adaptation, in order to have a qualified discussion in the infrastructure sector, it is essential to distinguish between the concepts of *resilient infrastructure* and *infrastructure for resilience*.

A *climate-resilient infrastructure* refers to infrastructure that is planned, designed, built, and operated in a way that anticipates, prepares, and adapts to climate change (OECD, 2024). This type of infrastructure is able to withstand and recover quickly from disruptions caused by changing weather conditions over its lifetime. The concept covers both new and existing assets, which may require physical readjustments or changes in their operation to deal with the impacts of climate change. This concept refers, therefore, to infrastructure assets capable of resisting, absorbing, and recovering from shocks and stresses, such as natural disasters or climate change—as we will see below, the focus is on project *outputs*, such as bridges or more robust power grids.

The concept of *infrastructure for resilience*, on the other hand, refers to the promotion of the results achieved (*outcomes*) from the use of an infrastructure asset that will increase the adaptive capacity of communities, value chains, and systems in the face of climate shocks—for example, infrastructures that provide system redundancy, or facilitate the mitigation of climate impacts in crisis contexts. Confusing these concepts can lead to prioritization of investments that do not necessarily contribute to systemic resilience, diverting resources from interventions that could generate more lasting and equitable impacts. This compromises the effectiveness of public policies by focusing on the robustness of the infrastructure itself, rather than considering its strategic role in reducing social and economic vulnerabilities.

In this context, it is necessary to conceptually differentiate the *outputs*, *outcomes* and long-term effects (*impacts*) of an infrastructure asset2:

- *Outputs* refer to the products, capital goods and services delivered under the project, designed to respond to the specific context of climate vulnerability in which the intervention is inserted, with the aim of promoting climate resilience. For example: hectare of restored mangroves; Coastal city with approved resilience plan. *Outputs* may also include relevant policies and plans at the regional or national level that are being developed or updated with project support. In addition, *outputs* may cover institutional, technical or operational changes resulting from implementation, as long as they contribute directly to the achievement of the expected *outcomes*. Such elements can be reported at the end of the project execution period or, in some cases, *ex ante* at the time of its approval.

1. The *outcomes* refer to the short and medium-term effects, foreseen or actually achieved by the project, which may manifest themselves in the form of adjustments in physical, human or environmental systems, as well as associated economic benefits. For example, kilometers of coastline protected from the risk of climate-induced disasters as a result of mangrove forests. Such effects must be aligned with the specific context of climate vulnerability in which the project is inserted, contributing to the strengthening of climate resilience. The *outcomes* can be reported over the expected useful life of the assets and/or systems financed, or even *ex ante* at the time of project approval. Its verification can also occur through *ex post* evaluations. The typical time horizons for the observation of these results are between one and five years after the completion of the project.
2. Long-term *impacts* refer to the long-term primary and secondary effects resulting from the project, whether direct or

2 The definition agreed upon by the main Multilateral Development Banks is adopted here (IDB et al., 2019).

indirect, intentional or unintentional, that can contribute to strengthening climate resilience on a broader scale, increasing adaptive capacity, and/or reducing climate vulnerability. For example, the increase in resilience of coastal communities and assets, as measured by an *ex-post* analysis, assessing the reduction in revenue loss from climate-related risks. Due to the longer time horizons and inherent uncertainties, impacts are generally inferred or expressed in qualitative and descriptive terms, and can also be evaluated through long-term *ex-post* analyses. The deadlines for observing these impacts are generally in the order of years to decades after the implementation of the project.

## 3. SYSTEMIC RESILIENCE

Once we understand the different levels of resilience promoted by an infrastructure investment project, we can move on to the concept of systemic resilience, or systems resilience. This concept is based on the understanding that critical infrastructure systems—which include transportation, energy, water supply, and telecommunications—function as interconnected networks that provide essential services at local, regional, and global levels. This conceptual definition has become increasingly relevant given the overlapping and achievement of shocks derived from extreme weather events that have imposed increasingly frequent and more intense challenges for infrastructure networks (Allan *et al.*, 2023; Pörtner *et al.*, 2022). These shocks expose deep vulnerabilities in the design, operation, and governance of these infrastructure assets, causing direct impacts on public safety, economic stability, and environmental integrity.

The concept of systemic resilience, according to UNDRR (2022), can be defined as a property of an infrastructure system that emerges dynamically when infrastructure assets are organized in such a way as to ensure the continuous provision of agreed critical services—such as energy, telecommunications, urban mobility, water supply, and sewage and waste collection—even in the face of endogenous and/or exogenous threats, as well as in the face of the

addition, modification or removal of infrastructure components. The emblematic case described in Chart 1 exemplifies this concept in a practical way.

### Exhibit 1: The MRGO Shipping Channel and New Orleans' Systemic Resilience

In 1965, a navigation canal was built 11 meters deep and 200 meters wide with the aim of connecting the New Orleans Industrial Canal to the open sea, to the east, in order to facilitate maritime access to the city. However, just three months after its completion, Hurricane Betsy struck the region, becoming the first disaster in the United States to surpass $1 billion in economic losses – an impact amplified by the presence of the MRGO Channel. Classified as a Category 3 hurricane, Betsy had prevailing easterly winds from the Gulf of Mexico, bypassing defenses along Lake Pontchartrain, which would usually be sufficient to contain this type of event. Instead, the storm drove a 10-foot (3.6 m) rise through the MRGO Canal toward the Industrial Canal, breaching the recently exposed low levees and causing significant flooding in the eastern part of the city.

As a result, approximately 13,000 homes were submerged by waters with a depth of up to 2.7 meters, leaving about 60,000 people homeless and causing 58 deaths. This episode highlights how engineering decisions and infrastructure interventions, when disconnected from climate risk and systemic impact analyses, can amplify the vulnerability of densely populated urban areas, transforming works designed for economic development purposes into vectors of risk and disaster.

The construction of the MRGO Canal is an emblematic example of the failure to prioritize the systemic resilience of a city–in this case, New Orleans–in the face of a familiar challenge, such as hurricanes. Although the canal itself had characteristics of resilient infrastructure, its implementation compromised the resilience of the urban system as a whole. In contrast, the decision to deactivate the channel after the passage of Hurricane Katrina – which once again highlighted the systemic weaknesses resulting from its presence – resulted in the strengthening of the city's systemic resilience, demonstrating the importance of considering the integrated and interdependent effects of infrastructures in the territories where they are located.

*Source: Shaffe et al. (2009)*

The need for investments that promote the systemic resilience of supply chains, municipalities, or regions stems from the fact that traditional resilience investment approaches, which focus on isolated interventions, cannot adequately address cascading failures—for example, when an interruption in the electricity system compromises water supply, transportation, and emergency services. This fact highlights the need for systemic strategies that consider these interdependencies. Moreover, these vulnerabilities do not affect all communities equally: socioeconomically disadvantaged populations, especially in the Global South, face disproportionate impacts due to structural inequalities and regressive distribution of access to basic infrastructure services (Aberra *et al.*, 2024; Bhargava & Bhargava, 2023; Benevenuto & Caulfield, 2019).

To address these complexities, the concept of systemic resilience has gained prominence as a key framework for understanding and managing interconnected infrastructures. This approach emphasizes the ability of infrastructure networks to absorb, adapt, and recover from disruptions while maintaining their essential functions, recognizing that failures in one sector can trigger cascading effects in others (Linkov *et al.*, 2014; Sathurshan *et al.*, 2022). Systemic resilience challenges traditional fragmented planning by proposing a "system of systems" perspective, which is crucial in the face of compounding climate risks, aging infrastructures, and increasing reliance on digital technologies (Francis & Bekera, 2014). Applying systemic resilience enhances infrastructure governance by aligning design, investment, and operation with complex, multi-risk environments, going beyond protecting isolated assets. It recognizes that failures emerge not only from external shocks, but also from structural weaknesses and functional dependencies between systems, as exemplified by the interruption of the electricity grid affecting water and transportation services (Hickford *et al.*, 2018). In addition, robust systemic resilience metrics are essential to assess vulnerabilities, guide sustainable and inclusive investments, and promote data-driven decisions, catalyzing public and private investments in climate-resilient infrastructure (OECD, 2024).

## 4. THE CLIMATE ADAPTATION AND RESILIENCE INVESTMENT GAP

Global demand for climate change adaptation finance far outstrips the financial flows currently mobilized by the public and private sectors. The *Global Landscape of Climate Finance* 2023 report estimates that developing countries will need $212 billion per year by 2030 for adaptation finance, increasing to $239 billion per year between 2031 and 2050. The *UNEP Adaptation Gap Report* 2023 suggests a similar range, between US$130–415 billion annually this decade, with a significant increase by 2050. The difficulty in mobilizing this capital increases the exposure of populations and assets to the adverse impacts resulting from the worsening climate scenario. Table 1 shows in a comparative perspective the order of magnitude of the estimated investments for adaptation in the infrastructure sector in relation to other economic sectors for developing countries.

**Table 1:** Sectoral adaptation costs *(Source: CPI, 2023; UNEP, 2023)*

| Sector | Type of cost | Estimated Cost (developing countries) |
|---|---|---|
| **Infrastructure** | Resilience in the construction, energy, and transportation sectors. | USD 56 billion/year, with a significant increase until 2050 |
| **Coastal zones** | Coastal protection and beach restoration | USD 56 billion/year (2010-2050) |
| **River floods** | Protection against river flooding | USD 54 billion/year |
| **Early warning and social protection** | Universal early warning systems | USD 16 billion/year |
| **Agriculture** | Reducing the impact of climate change on chronic hunger | USD 16 billion/year |
| **Health** | Control of climate-related diseases and mortality | USD 11 billion/year until the 2050 |

Information on national public financing for climate change adaptation, as well as from the private sector, is still scarce and non-transparent. However, it is possible to observe a diversity of sources and financial instruments involved in climate adaptation finance. Governments, multilateral banks, private financial institutions, and individuals contribute resources through grants, concessional loans, market investments, and equity.

However, data from the Citi GPS report (2023) indicate that global financing for adaptation investments is still heavily concentrated in public sources, representing 97% of the resources allocated to adaptation between 2021 and 2022. This reflects the difficulty that many companies face in realizing the usefulness or profitability of adaptation investments. This information is essential to qualify the pricing of climate risk and thus facilitate the mobilization of private financing for adaptation. Business decision-making depends on a clear assessment of the financial impacts of weather events—such as operational disruptions or lost revenue—,but local variability and scarcity of data make accurate estimates difficult. Without proper measurement, private investors tend to avoid adaptation projects, aggravating future risks. In addition, it becomes difficult to estimate the costs of inaction, as the benefits of interventions often only manifest themselves after extreme events occur (OECD, 2023a).

Recent data indicate that climate adaptation finance between 2021 and 2022 accounted for a total of $68 billion on average annually during the period analyzed (Wignarajah *et al.*, 2023). Although this amount more than doubled between 2018 and 2022, the amounts of adaptation finance are still significantly lower than the resources allocated to mitigation (US$ 1.171 billion). The public sector continued to be the main source of these flows (92% in 2022), predominating in the water infrastructure and sanitation (88%) and AFOLU (agriculture, forestry, and land use) sectors. In any case, the relatively low volume of financing for adaptation compared to mitigation suggests the need to rebalance global priorities.

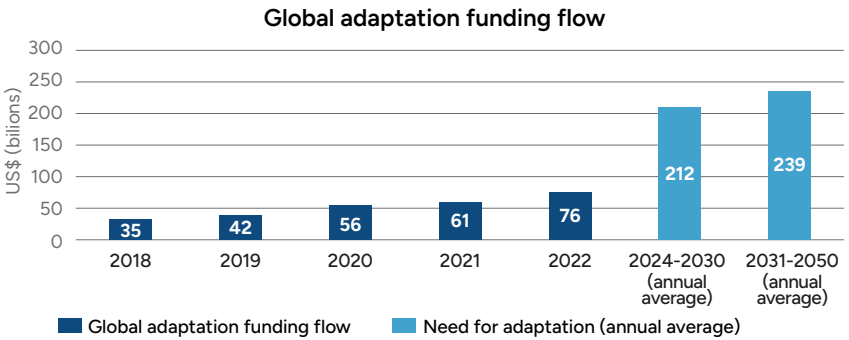



**Figure 2:** Global adaptation finance flows – Background vs Future need
*(Source: Wignarajah et al., 2023)*

In a scenario of increasing fiscal constraint, it becomes evident that to achieve such increments in financial flows for adaptation requires a composition between public and private investments. However, such investments often face significant obstacles to being allocated to climate adaptation projects, largely due to the scarcity of projects that meet minimum technical, financial, legal, and environmental feasibility requirements. This gap is one of the main obstacles to capital mobilization on a scale compatible with climate challenges, and is widely recognized as one of the structural factors that limit the advance of investments in resilience. The International Monetary Fund (2024) points out that the efficiency of public investments, especially in low-income countries, is directly conditioned by the quality of the project cycle, including critical steps such as the preparation, selection, and management of projects. Although the number of projects oriented to the private sector has grown significantly in recent decades, initiatives that incorporate robust climate adaptation components still represent a minority fraction of the total portfolio of structured projects (CPI, 2015). In addition to this context, there are the uncertainties inherent in the assessment of climate risks and the measurement of the benefits of resilience, which make it difficult to properly price assets and make innovative financial instruments viable. In this sense, the strengthening of institutional capacities and the modernization of project structuring processes emerge as central elements to unlock

investment flows and catalyze interventions that meet the urgency imposed by climate change.

## 5. MAINSTREAMING RESILIENCE IN THE STRUCTURING OF INVESTMENT PROJECTS

To achieve compatible levels of financial flows needed for adaptation in the infrastructure sector, it is essential to scale up investments without compromising the quality of projects. In this sense, the improvement of the processes for structuring infrastructure projects represents a strategic lever to accelerate the execution and ensure the quality of investments aimed at promoting systemic resilience.

The preparation of investment projects refers to the conduction of feasibility studies and the preparation of the technical, economic-financial, legal and managerial documentation necessary for the bidding of projects in sectors of economic and social infrastructure. Over the last decade, there has been significant progress in the Brazilian context in the modernization of governance, evaluation, and structuring processes for infrastructure investment projects (Moraes *et al*., 2024; OECD, 2023b). One of the highlights in this process was the adoption of the Five Case Model (5CM), inspired and adapted from the British *Five Case Model*, as a methodology for structuring investment projects as a reference for national and subnational infrastructure (Moraes *et al*, 2024; Brazil, 2022).

5CM is an internationally recommended methodology (G20, 2017; HM Treasury, 2022) and progressively endorsed at the national level by institutions such as the Federal Court of Accounts, the Interministerial Governance Committee, the Special Secretariat of the Investment Partnerships Program of the Chief of Staff, among other public entities at the federal, state, and municipal levels (Turolla *et al*., 2025). Notably, 5CM offers a robust analytical framework that allows for the systematic incorporation of climate resilience objectives in the different spheres of analysis—strategic,

economic, financial, commercial, and managerial—of investment projects (HM Treasury, 2022).

By introducing the resilience perspective in the preparation of the various phases of the project life cycle, the model enables the early identification of risks and opportunities associated with climate change, promoting more comprehensive assessments of the long-term socioeconomic value, including the so-called *resilience* dividends (WRI, 2025). The requirement of criteria linked to climate resilience favors the alignment of infrastructure investments with adaptation goals, current regulatory frameworks, and the expectations of different stakeholders, contributing to the implementation of more robust public assets prepared for future challenges.

Below are elements that demonstrate how the promotion of climate resilience can be strengthened in each of the five dimensions recommended by such a model for structuring a project.

## Strategic Case: Alignment with Climate Adaptation Policies

Several recent events, such as the floods that occurred in the state of Rio Grande do Sul (2023), Pernambuco (2022) and Bahia (2021), among other climate catastrophes, show that a large part of the Brazilian infrastructure still does not systematically incorporate the consideration of climate risks in its strategic planning. The lack of alignment between the individual goals of each project and the adaptation guidelines established at local, regional, and national levels results in fragmented actions and the absence of coordination between sectoral interventions (OECD, 2023a). The incorporation of climate resilience begins in the Strategic Dimension, where the justification of the project and its articulation with the broader objectives of public policies are defined. To ensure the integration of climate resilience from the initial phases of project design, its objectives must be explicitly aligned with national strategies (such as the Ministry of Transport's *Adaptavias* Studies) and subnational strategies (such as Drainage Master Plans), promoting coherence with current public adaptation policies. This alignment ensures that infrastructure investments not only meet current

service needs, but are also prepared to face future climate-related uncertainties.

## Economic Case: Assessment of resilience in the various alternatives

The economic dimension offers a rigorous basis for evaluating the socioeconomic cost-benefit ratio of the project, and is essential for quantitatively verifying the resilience dividends (WRI, 2025) generated in the evaluation of each alternative. Specifically to address the issue of climate risks at this stage, the federal government in partnership with the German Cooperation Agency (GIZ) published the Climate Risks annex of the *General Guide for Socioeconomic Cost-Benefit Analysis of Infrastructure Investment Projects* (Brasil, 2022b). This document establishes a methodology for incorporating the risks associated with climate change into the evaluation of projects in any infrastructure sector. The methodology is structured in three main stages: initially, a screening is carried out to identify whether the project is exposed to relevant climate risks, such as sea level rise, droughts or floods. If exposure is identified, a detailed analysis of the potential impacts on the project's costs and benefits is carried out, considering both chronic (gradual changes) and acute (extreme events) risks. Finally, the results of this evaluation are integrated into the decision-making process, allowing the comparison of scenarios with and without adaptation and the evaluation of the socioeconomic feasibility of the proposed interventions. The analysis of the economic dimension, incorporating such a climate risk assessment tool, allows the elements of adaptation to be no longer seen as additional costs and are now recognized as fundamental components for efficiency and economic sustainability throughout the project life cycle.

## Financial Case: Enabling the Financing of Adaptation Projects

In the Financial Dimension, the financial viability, sources of financing, and financial risks of the project are evaluated — including those related to variability and climate change. Resilience can

be incorporated by considering life cycle costs that include maintenance, repairs, and operation under different climate scenarios. Climate adaptation infrastructure financing mechanisms through Public-Private Partnerships (PPPs) stand out as a relevant alternative to enable large projects that require robust investments and risk sharing. Several flood risk management and coastal resilience projects, such as the *Fargo-Moorhead River Diversion Project* (USA), *Broadland Flood Protection* (UK) and *Mission Rock in San Francisco* (USA), have been financed by PPPs that include compensation through "availability payments", performance contracts or real estate value capture, depending on the model adopted (World Bank, 2025). Ensuring financial sustainability in a climate change future requires that the physical risks associated with such new climate scenarios be priced in from the outset, allowing for more robust and predictable financial planning.

### Commercial Case: Contracting models and market sounding

The Commercial Dimension analyzes contracting and execution mechanisms, offering an opportunity to integrate climate resilience through market engagement and contract structuring. Resilience can be fostered, for example, through performance contracts that reward outcomes related to climate adaptation, such as continuity of services during extreme events or energy efficiency under adverse weather conditions. Early engagement with suppliers and private sector actors can also reveal technological solutions and innovations that support adaptation. In addition, market consultation processes can assess the feasibility and attractiveness of delivering resilient infrastructure under current conditions, identifying any capacity gaps or incentives needed to align the private sector with resilience objectives.

### Management Case: Governance, risk management and project evaluation

The Managerial Dimension deals with project governance, execution planning, and risk management, and is key to operationa-

lizing climate resilience. This includes establishing clear institutional responsibilities for the implementation of adaptation measures, monitoring climate performance indicators, and adopting adaptive management processes throughout the project cycle. Resilience must be present in risk records and contingency plans, with protocols defined to respond to adverse weather events . Capacity-building initiatives aimed at project teams and executing agencies are also key to ensuring that resilience measures are effectively implemented. In addition, continuous learning mechanisms—through monitoring, post-implementation evaluation, and updates based on new climate data—must be incorporated to ensure the constant improvement of adaptation actions.

## 6. CONCLUSION

The analysis developed throughout this chapter shows that incorporating climate resilience into infrastructure investments is not only a technical necessity, but a strategic imperative for sustainable development. Evidence demonstrates that the intensification of physical risks related to climate change poses a direct threat to the functionality and economic value of infrastructure assets, while widening social and territorial inequalities. Responding to this challenge requires a profound transformation in the way governments, investors, and financial institutions conceive, plan, and execute projects—moving from a reactive logic of point protection to a proactive approach of strengthening systemic resilience.

In this sense, distinguishing between resilient infrastructure and infrastructure for resilience is crucial to guide investments that not only withstand climate events, but also expand the adaptive capacity of communities and productive systems. The focus on *outcomes* and long-term *impacts* reinforces the need to measure the effectiveness of investments from a broader socioeconomic perspective, which includes externalities and equity in the distribution of costs and benefits. This systemic view is what allows us to understand infrastructure as a vector of structural transformation, capable of reducing vulnerabilities, boosting pro-

ductivity, and promoting social cohesion in the face of a rapidly changing climate.

At the same time, the persistent gap in adaptation finance reflects not only the scarcity of resources, but the difficulty of structuring projects that are bankable, traceable, and aligned with international taxonomies and methodologies. Institutional strengthening and technical qualification of structuring processes become, therefore, determining factors to unlock investment at scale. Methodologies such as 5CM offer a concrete pathway to integrate climate resilience criteria at all stages of the project cycle—from strategic justification to governance and *ex-post* evaluation—ensuring that resilience is treated as a cross-cutting axis of public investment policy and public-private partnerships.

Finally, building a robust portfolio of climate-adapted infrastructure projects requires a new generation of financial, regulatory, and institutional instruments, which foster synergies between public and private capital and recognize "resilience dividends" as an integral part of the return on investment. By articulating consistent methodologies, clear prioritization criteria, and impact metrics, decision-makers will be able to prioritize more rational and efficient investments, reducing future costs and expanding collective benefits.

## REFERENCES


Aberra, F., Harrod, C., Mays, M., & Stevenson, H. (2024, May). **The Ethics of Disaster Resilient Infrastructure Maintenance and Social Equity**. In 2024 Systems and Information Engineering Design Symposium (SIEDS) (pp. 466-471). IEEE.

Banco Interamericano de Desenvolvimento (BID), African Development Bank, Asian Development Bank, Asian Infrastructure Investment Bank, European Bank for Reconstruction and Development, European Investment Bank, International Development Finance Club, & Islamic Development Bank (2019). **A Framework and Principles for Climate Resilience Metrics in Financing Operations**. Disponível em: https://doi.org/10.18235/0002040

Benevenuto, R., & Caulfield, B. (2019). **Poverty and transport in the global south: An overview. Transport Policy**, 79, 115-124.

Bhargava, R., & Bhargava, M. (2023). **The climate crisis disproportionately hits the poor**. How can we protect them. In World Economic Forum

Blanc-Brude, F., A. Gupta., J.Lee, F. Nugier & T. Whittaker, "**The cost of international sanctions to investors in Russia's airports**" (March 2022). Disponível em: https://edhecinfraprivateassets.com/paper/the-cost-of-international-sanctions-to-investors-in-russias-airports/

Brandon, C., Kratzer, B., Aggarwal, A. and Heubaum, H. (2025). World Resources Institute. **Working paper: Strengthening the investment case for climate adaptation: A triple dividend approach**. DOI https://doi.org/10.46830/wriwp.25.00019

Brazil, 2022a. **Structuring infrastructure investment proposals: a five-dimensional model. Brasilia**. Available at: https://www.gov.br/mdic/pt-br/assuntos/choque-de-investimento-privado/modelo-de-cinco-dimensoes/guia-modelo-de-cinco-dimensoes.pdf

Brazil, 2022b. **Annex II – Climate Risks**. Annex to the General Guide for Socioeconomic Cost-Benefit Analysis of Infrastructure Investment Projects - ACB Guide. Available at: https://www.gov.br/mdic/pt-br/assuntos/choque-de-investimento-privado/avaliacao-socioeconomica-de-custo-beneficio-1/anexo-riscos-climaticos-1.pdf

Climate Policy Initiative – CPI. (2024). **Tracking and Mobilizing Private Sector Climate Adaptation Finance**. Disponível em: https://www.climatepolicyinitiative.org/wp-content/uploads/2024/09/Tracking-and-Mobilizing-Private-Sector-Climate-Adaptation-Finance-2024.pdf

Climate Policy Initiative. (2023). **Global landscape of climate finance 2023**. Disponível em: https://www.climatepolicyinitiative.org/pt-br/publication/global-landscape-of-climate-finance-2023/

Climate Policy Initiative. (2023). **State and trends in climate adaptation finance**. Disponível em: https://gca.org/wp-content/uploads/2023/12/State-and-Trends-in-Climate-Adaptation-Finance-2023_WEB.pdf

Climate Policy Initiative (2015). **Emerging solutions to drive private investment in climate resilience**. Disponível em: https://climatepolicyinitiative.org/wp-content/uploads/2015/06/Finance-for-Climate-Resilience.pdf

National Confederation of Municipalities. 2025. **Panorama of Disasters in Brazil Study – 2013 to 2024**. Available at: https://cnm.org.br/storage/biblioteca/2025/Estudos_Tecnicos/ET_DEFCIVIVL_05-2025_Panorama_dos_Desastres_no_Brasil_2013_a_2024.pdf

Francis, R., & Bekera, B. (2014). **A metric and frameworks for resilience analysis of engineered and infrastructure systems**. Reliability engineering & system safety, 121, 90-103.

Fundo Monetário Internacional (2024). **Working paper: Public Investment Management Bottlenecks in Low-income Countries**. Disponível em: https://www.imf.org/-/media/Files/Publications/WP/2024/English/wpiea-2024232-print-pdf.ashx

Linkov, I., Bridges, T., Creutzig, F., Decker, J., Fox-Lent, C., Kröger, W., Lambert, J. H., Levermann, A., Montreuil, B., Nathwani, J., Nyer, R., Renn, O., Scharte, B., Scheffler, A., Schreurs, M., & Thiel-Clemen, T. (2014). **Changing the resilience paradigm**. Nature Climate Change, 4(6), 407-409. https://doi.org/10.1038/nclimate2227

Marcelo, Darwin and Frederic Blanc-Brude, "**It's Getting Physical**" SSRN (2023). http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.4784951

Moraes, R., Peci, A. Pompermayer, F. M, Lucas, L. F. C., Rech, T., Marinho, S. (2024). **Quantitative indicators of the OECD and Brazil: public governance**. Rio de Janeiro: Ipea: ECLAC, 2024. v. 3. ISBN: 978-65-5635-079-0. DOI: http://dx.doi.org/10.38116/9786556350790

G20 (2017). **G20 Principles for the Infrastructure Project Preparation Phase Prepared by the Infrastructure Working Group**. Disponível em: https://cdn.gihub.org/umbraco/media/2570/g20-principles-for-the-project-prep-phase.pdf

HM Trasury, 2023. **Infrastructure and Projects Authority – Infrastructure Busines Case: International Guidance**. Disponível em: https://assets.publishing.service.gov.uk/media/623b24e6e90e07799f0c7c3e/Infrastructure_Business_Case_International_Guidance.pdf

OECD (2024), **Infrastructure for a Climate-Resilient Future**, OECD Publishing, Paris. Disponível em: https://doi.org/10.1787/a74a45b0-en

OECD (2023a). **Green Finance and Investment Scaling Up Adaptation Finance in Developing Countries** CHALLENGES AND OPPORTUNITIES FOR INTERNATIONAL PROVIDERS. Disponível em: https://www.oecd.org/content/dam/oecd/en/publications/reports/2023/11/scaling-up-adaptation-finance-in-developing-countries_4f4b0a0a/b0878862-en.pdf

OECD (2023b). Economic **Surveys: Brazil 2023**. Disponível em: https://www.oecd.org/en/publications/oecd-economic-surveys-brazil-2023_a2d6acac-en.html

Sathurshan, M., Saja, A., Thamboo, J., Haraguchi, M., & Navaratnam, S. (2022). **Resilience of critical infrastructure systems: a systematic literature review of measurement frameworks. Infrastructures**, 7(5), 67. Disponível em: https://www.mdpi.com/2412-3811/7/5/67

Shaffer, Gary P., John W. Day, Sarah Mack, G. Paul Kemp, Ivor van Heerden, Michael A. Poirrier, Karen A. Westphal, *et al.* "**The MRGO Navigation Project: A Massive Human-Induced Environmental, Economic, and Storm Disaster**." Journal of Coastal Research, 2009, 206–24. http://www.jstor.org/stable/25737481

Turolla, F., Benevenuto, R., Botassio, D, Igrejas, R. (2023) **Working paper: New protocols in the structuring of infrastructure projects in Brazil**. PSP Hub Infrastructure and Urbanism Studies. Available at: https://psphub.org/wp-content/uploads/2023/12/2023_12_02-PSP_Hub-WP004-Estruturacao_projetos_Brasil.pdf

United Nations Office for Disaster Risk Reduction - UNDRR (2022). **Principles for resilient infrastructure**. Disponível em: https://www.undrr.org/quick/70250

Verschuur, Jasper, Elco E. Koks, and Jim W. Hall, "**Systemic risks from climate-related disruptions at ports**," Nature Climate Change, 13, no. 8 (2023): 804-806. https://doi.org/10.1038/s41558-023-01754-w

UNEP (2023). Underfinanced. Underprepared. **Adaptation Finance Gap Update 2023 Inadequate investment and planning on climate adaptation leaves world exposed**. Disponível em: https://unfccc.int/sites/default/files/resource/Finance_Gap_Update.pdf

Wignarajah, D., Richmond, M., Stout, S., Martinez, G., Schell-Smith, K., & Padmanabhi, R. (2023). State and Trends in Climate Adaptation Finance 2023. **Climate Policy Initiative, Global Center on Adaptation Report**. Disponível em https://www.climatepolicyinitiative.org/wp-content/uploads/2023/12/State-and-Trends-in-Climate-Adaptation-Finance-2023_.pdf

World Bank, 2019. **Joint methodology for tracking climate change adaptation finance**. Disponível em: https://thedocs.worldbank.org/en/doc/20cd787e947dbf44598741469538a4ab-0020012022/original/20220242-mdbs-joint-methodology-climate-change-adaptation-finance-en.pdf

World Bank, 2025. **Financing Climate Adaptation Nature-based Infrastructure**. Disponível em: https://documents1.worldbank.org/curated/en/099050725135521570/pdf/P501013-299da78d-86cc-4f74-a095-cde17655875a.pdf

World Resources Institue – WRI (2025). **Working paper: Strengthening the Investment Case for Climate Adaptation:**

**A Triple Dividend Approach**. Disponível em: https://doi.org/10.46830/wriwp.25.00019

# PARTE II

## RISCOS CLIMÁTICOS NAS INFRAESTRUTURAS

# PART II

## CLIMATE RISKS IN INFRASTRUCTURE

3

# POLÍTICAS PÚBLICAS E AÇÕES REGULATÓRIAS PARA REDUÇÃO DOS RISCOS CLIMÁTICOS NOS ATIVOS RODOVIÁRIOS DO BRASIL

**FERNANDO BARBELLI FEITOSA,**
**FELIPE FERNANDES**
**E RICARDO LUIZ MEDEIROS MEIRELLES**

## RESUMO

Os Riscos Climáticos sempre figuraram como tema de atenção para as infraestruturas de transportes. Em 2025, o Estado do Rio Grande do Sul foi impactado de forma bastante contundente por inundações e alagamentos, afetando diretamente rodovias e ferrovias. As políticas públicas e ações regulatórias possuem papel essencial no incentivo para execução de ações visando a adaptação e aumento da resiliência das infraestruturas rodoviárias. O presente artigo tem o objetivo de apresentar como as recentes políticas públicas e ações regulatórias do Brasil estão evoluindo de forma a possibilitar o enfrentamento dos impactos das mudanças do clima pelos agentes públicos, como o programa ProAdaptaVias, a regulamentação de debêntures incentivadas e o desenvolvimento do Programa de Sustentabilidade para Infraestrutura de Rodovias e Ferrovias concedidas.

### Palavras-chave

Infraestrutura, rodovias, riscos climáticos, políticas públicas

## INTRODUÇÃO

As obras de infraestrutura rodoviária e ferroviária são projetadas para atender padrões climáticos históricos, que, inclusive, pautam regras específicas, como o Manual de Drenagem de Rodovias (DNIT, 2006) e o Manual de Hidrologia Básica para estruturas de drenagem (DNIT, 2005). Contudo, o aquecimento global, proveniente principalmente da emissão de gases do efeito estufa (GEE), tem apresentado alta variação, incidente sobretudo nos eventos hidrometeorológicos mais recentes, como registrado no Rio Grande do Sul em maio de 2024, demonstrando que os parâmetros construtivos baseados em dados históricos não suportam as necessidades apresentadas pelos eventos climáticos para construção de uma infraestrutura plenamente resiliente. Com efeito, a malha ferroviária do RS foi 100% comprometida, enquanto a rodoviária foi bastante afetada em sua capacidade (BID, 2024).

O dimensionamento das infraestruturas de transportes baseadas em eventos futuros, cujos modelos matemáticos atuais não conseguem definir precisamente as alterações climáticas que poderão impactá-las, demandarão muitos estudos técnicos-científicos e estarão vinculados aos prognósticos destes modelos. Nesse contexto, os recentes arranjos dos contratos de concessão rodoviárias federais, que em sua estruturação já consideram a certeza do risco climático para estabelecer ações mitigadoras do impacto nas intervenções rodoviárias, garantem mecanismos para restabelecimento rápido das infraestruturas. Também são de relevante importância as políticas públicas que fomentam a resiliência das infraestruturas, em especial o AdaptaVias e as debentures incentivadas e de infraestrutura, entre outras.

Essas ações formam um pacote centralizado de conhecimento e enfrentamento ao risco climático das infraestruturas de transportes. O presente estudo visa, a partir de uma abordagem descritiva e lógico-indutiva, inquirir os institutos públicos postos à disposição das concessões de rodovias, para demonstrar sua utilidade e eventuais efeitos pragmáticos.

Visa-se indicar com essa discussão que, a despeito das soluções já implementadas, há ainda muitas ações que o Poder Público

pode implementar para lidar adequadamente, com as intempéries climáticas que tendem a ser mais extremas e elevar os riscos para as infraestruturas de transportes. Com efeito, cabe ao Estado, em conjunto com seus contratados, viabilizar caminhos de contorno, que garantam a resiliências de suas infraestruturas e a continuidade do serviço público concedido.

## 1. O CASO DO ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL

Em maio de 2024, o Estado do Rio Grande do Sul foi assolado pela maior enchente já registrada, com uma carga pluviométrica muito acima das capacidades instaladas, atingindo diversos municípios e deixando 581.638 desalojados na região (BID, 2024). A despeito da surpresa das autoridades locais, é fato que já vinha se registando, historicamente, enchentes nos municípios que margeiam o rio Uruguai (BID, 2024). Contudo, os impactos sobre a rede viária daquele Estado foram devastadores, verificando-se que a intercorrência climática (chuvas, enchentes e enxurradas devastadoras) causou um colapso dos sistemas de transportes locais e regionais.

Conforme o BID (2024), foram 11.392 Km de rodovias atingidos em diferentes graus pelas enchentes, estimando-se em mais de R$ 2 bilhões em danos, entre rodovias sob administração pública e concedidas, sendo que aproximadamente R$ 611 milhões corresponderiam à parcela incorrida pelas infraestruturas geridas pela iniciativa privada. No âmbito das concessões rodoviárias federais, vale observar, cuidam-se de dois complexos viários compostos pelas Rodovias BR-116/RS e BR-392/RS, concedidos à Ecovias Sul e BR-101/290/336/448/RS, concedidos à Via Sul do Grupo Motiva (antiga CCR Rodovias).

Com efeito, a despeito de as infraestruturas federais concedidas terem sido também profundamente atingidas pelas referidas enchentes, o tema dos riscos climáticos e resiliência das infraestruturas rodoviárias já constituía objeto de ações de aprimoramento contratual e políticas públicas. Esse movimento já constitui uma resposta pública aos eventos da natureza que vem assolando o Brasil e o mundo, e viabilizam que as infraestruturas rodoviárias concedidas possam ter uma resposta mais rápida para essas ocasiões.

Assim, o objetivo do presente artigo reside em, partindo da função precípua das políticas públicas e de sua derivação, a política

regulatória, demonstrar como o contrato de concessão de rodovias federais e as políticas de resiliência climática evoluíram, para aumentar a resiliência aos impactos das ameaças climáticas como as que assolaram o Rio Grande do Sul. Nesse sentido, se partirá desse conceito das políticas públicas, para se analisar as ações de governo e instrumentos regulatórios e contratuais voltados para esse embate.

## 2. O PAPEL DAS POLÍTICAS PÚBLICAS

Conforme as lições de Howlett, Ramesh e Perl (2013), Políticas Públicas são institutos apreensíveis pela conjugação de duas ou mais disciplinas científicas, dentre elas, direito, ciência política, economia e administração pública, que centram seu enfoque em uma ação governamental qualificada, em busca de sua estruturação, razões e finalidades. Sob uma perspectiva jurídica, alocam-se no campo do Direito Público, enquanto a instrumentalização de uma vontade política declarada pelo Poder Legislativo ou no próprio seio do Poder Executivo, sem deixar de mencionar eventual decisão com comando de aplicação (ou omissão) em face do dever perante determinada política pública enunciada (p. ex.: garantia da saúde pública). Sob a perspectiva das ciências sociais, propõe-se como ação governamental formulada por parâmetros racionais e sujeitas à análise de pesquisadores, historicamente concebidas como ferramentas de decisão governamental.

Ante essa miríade de elementos, vislumbra-se a política pública como a ação estatal destinada ao atendimento de uma necessidade social, que se forma de uma proposição política e deve ser envolvida por competente processo administrativo em sua execução e transparência em sua verificação, para que demonstre o cumprimento de seus objetivos. No campo da pesquisa, mister que se entenda tanto o *leitmotiv* que gerou a ideia (direcionada a combater um problema que aflige parcela ou o total da população), que deve estar bem identificada com o domínio da política e seus agentes, quanto a eventual discricionariedade que envolve seu processo de execução, uma vez que aos agentes públicos não é garantida a plena liberdade de meios para sua implantação, mas sim orientadas por princípios do direito público.

Cabe visualizar que, nesse caminho dinâmico, faz-se útil o conceito de Thomas Dye (1984) em torno do "governo em ação", pelo qual se permite isolar, nesta sorte de análise, o agente público primário do *policy making*, a decisão governamental (constituída em um fazer ou omitir-se em relação a um problema identificado), assim como a deliberação consciente do Governo no sentido apontado. Envolvem ainda este enredo as limitações tanto do decisor, quanto do executor, que não detém todo conhecimento sobre o problema, tampouco sobre eventuais efeitos colaterais que eventual política pode vir a gerar. Talvez um dos exemplos mais emblemáticos dos resultados indesejados de política pública seja o combate ao tráfico de drogas acabar por influenciar na formação das milícias, em especial no Rio de Janeiro.

Por isso, em sua formação, cumpre respeitar o ciclo de definição da agenda, com identificação de alternativas, seguida de avaliação e seleção das opções, para posterior implementação e avaliação da política, de maneira que a decisão do Poder Público seja pautada em critérios racionais. É útil compreender que o *policy making*, ainda que formulado acidentalmente, constitui processo técnico-político baseado em algum critério.

Há que se constituir uma preocupação jurídica, nessa linha, que a política pública não se submeta a uma lógica tradicional da norma jurídica (estrutura hipotético-condicional), mas sim que se revista de estrutura fim-meio, porquanto política não pode simplificar a norma, e a busca dos objetivos deve ser o real designador da ação. Sob esse viés, a decisão administrativa deve prospectar para o futuro e, ressalte-se, estar assentada em estudos quantitativos e qualitativos, para durar tempo razoável a surtir efeitos.

Diante disso, a difícil definição de Políticas Públicas perpassa, necessariamente, pela compreensão de que o Governo, na sua ação executora típica, deve atender algumas necessidades de seus cidadãos, o que compõe atividade complexa sujeita ao escrutínio dos pesquisadores.

A política regulatória anda no mesmo sentido da política pública, sendo que nessa encontra sua razão fundamental. É a partir da política pública, dada pela lei ou pela manifestação da pasta setorial, que a regulação passa a encontrar seu fundamento, validade e ação e pode tomar corpo nos regulamentos setoriais.

Efetivamente, os riscos climáticos constituem, desde a década de 1990 (ECO Rio 92), objeto de políticas públicas e regulatórias, em diversos campos temáticos, sobretudo na perspectiva da prevenção e da mitigação dos efeitos gerados pelo aquecimento global em virtude da forte emissão de gases de efeito estufa (GEE) a partir da revolução industrial. As rodovias, consideradas nesse contexto como infraestruturas altamente expostas aos riscos climáticos, requerem medidas governamentais que possibilitem sua rápida recuperação nos casos de serem danificadas por eventos climáticos extremos, motivo pelo qual a análise das políticas públicas e das ações regulatórias disponíveis se faz tão essencial.

## 3. INSTRUMENTOS TÉCNICOS E LEGAIS PUBLICADOS PELO BRASIL

Dentre os instrumentos atualmente vigentes que dialogam com os riscos climáticos das infraestruturas rodoviárias se destacam duas políticas públicas e dois ordenamentos regulatórios. Em ambos os casos, há ações governamentais que mitigam efeitos dos riscos climáticos, ou apoiam na sua reparação.

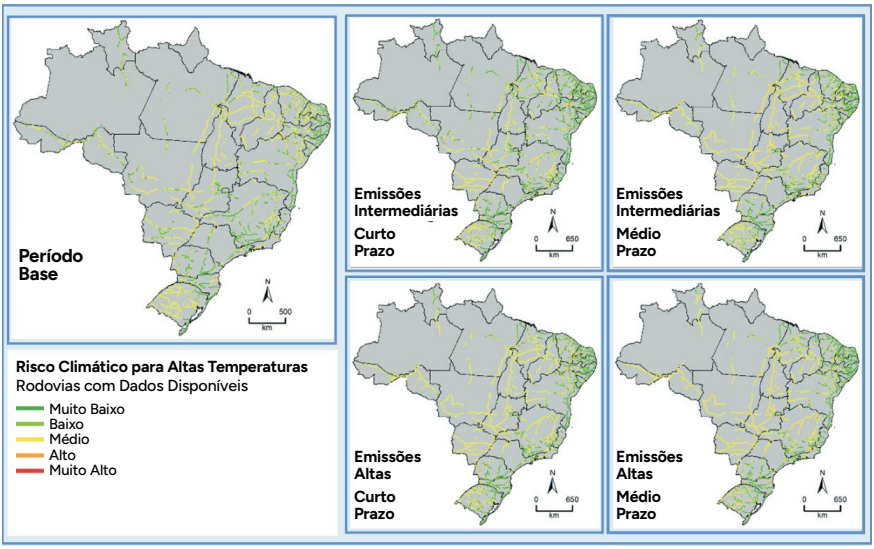
O primeiro instrumento que merece ser destacado é o Programa Federal AdaptaVias, recentemente tornado política pública, nos termos da Portaria MT nº 64, de 23 de janeiro de 2025. Denominado PRO-AdaptaVias, o programa se direciona à promoção da adaptação e do aumento da resiliência da infraestrutura federal de transportes terrestres frente à mudança do clima. Entre os princípios que orientam esse programa, que prevê o desenvolvimento das ações necessárias para a implementação da solução de inteligência, monitoramento, gestão, registro e armazenamento dos dados de adaptação à mudança do clima na infraestrutura federal de transportes terrestres (SIM-AdaptaVias), está claramente indicada a gestão de riscos e o foco na resiliência climática.

Inicialmente, foi realizado um levantamento dos impactos e riscos das mudanças do clima sobre a infraestrutura federal de transportes terrestres, em especial as rodovias, voltado a subsidiar decisões para mitigar ações decorrentes das ameaças climáticas. A ação, conduzida pelo Ministério dos Transportes, foi executada em parce-

ria com a Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit GmbH (GIZ), com apoio do Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações (MCTI) e do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (Inpe) e execução da Gitec Brasil e do Programa de Engenharia de Transportes da Coppe/UFRJ.

Nesse estudo1, foram consideradas as seguintes ameaças climáticas: alagamentos e inundações; queimadas e incêndios; deslizamentos; erosão; e impactos diretos das altas temperaturas. O trabalho considerou 3 horizontes temporais: data base (1981-2000), curto prazo (2026-2045) e médio prazo (2046-2065). Tomou como premissa, ainda, cenários de emissões intermediárias e altas. A partir desses dados, chegou-se ao Risco Climático na Infraestrutura (rodoviário e ferroviária) devido às ameaças climáticas, elaborando mapas para cada horizonte temporal e cenário de emissões. Também foi estudado o risco de impacto de altas temperaturas, conforme o Levantamento de Impactos e Riscos Climáticos sobre a Infraestrutura Federal de Transporte Terrestres existente, e projetada para rodovias se apresentou da conforme a figura abaixo.

**Figura 1:** Mapa de risco de impacto de altas temperaturas em rodovias



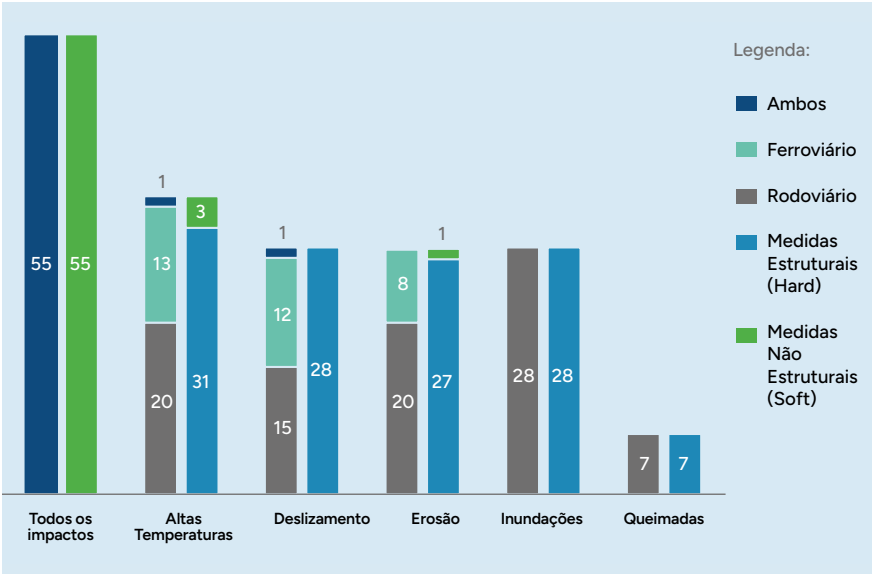

*Fonte: Levantamento de Impactos e Riscos Climáticos sobre a Infraestrutura*

1 Disponível em https://www.gov.br/transportes/pt-br/assuntos/sustentabilidade/projeto-adaptavias

*Federal de Transporte Terrestres (Rodoviário e Ferroviário) existente e projetada. Disponível em https://www.gov.br/transportes/pt-br/assuntos/sustentabilidade/projeto-adaptavias. Acesso em 14/07/2025.*

Os resultados do levantamento foram disponibilizados no sítio eletrônico do Ministério dos Transportes e indicam, inclusive, medidas de adaptação das infraestruturas estruturais e não estruturais nos modos rodoviário e ferroviário (vide figura 2). Para além de servirem de referência de ação para os entes subnacionais, ainda se criou uma estratégia de acompanhamento destas infraestruturas no âmbito federal, apta a gerar soluções tempestivas para que a gestão pública das rodovias possa dirigir ações corretivas e preventivas quanto às catástrofes climáticas. Como se comentará nos resultados, o acompanhamento deverá ser realizado por diferentes entes da federação, e gerar um portal de informações públicas úteis para gestores públicos, para usuários das infraestruturas e para a sociedade.

**Figura 2:** Medidas de Adaptação por tipo de impacto e classificação das medidas




*Fonte: Levantamento de Impactos e Riscos Climáticos sobre a Infraestrutura Federal de Transporte Terrestres (Rodoviário e Ferroviário) existente e projetada. Disponível em https://www.gov.br/transportes/pt-br/assuntos/sustentabilidade/projeto-adaptavias. Acesso em 14/07/2025.*

Outra política que também tem muita relação com o risco climático são as debentures incentivadas e de infraestrutura. A partir da Lei nº 14.801, de 9 de janeiro de 2024, e de sua alteração na Lei nº 12.431, de 24 de junho de 2011, as sociedades de propósito específico, concessionárias, permissionárias, autorizatárias ou arrendatárias, constituídas sob a forma de sociedade por ações, foram autorizadas a emitir debêntures com benefício fiscal de isenção ou redução do imposto de renda retido na fonte sobre os rendimentos pagos. Essa política foi, ainda, complementada pelo Decreto nº 11.964, de 26 de março de 2024, que indicou os critérios e as condições para enquadramento e acompanhamento dos projetos de investimento considerados como prioritários na área de infraestrutura.

A partir desse arcabouço mínimo, o Ministério dos Transportes direcionou a política pública nos termos da Portaria MT nº 689, de 17 de julho de 2024, para disciplinar requisitos e procedimentos para enquadramento e acompanhamento de projetos de investimento prioritários no setor de infraestrutura de transportes rodoviário e ferroviário, para fins de emissão de debêntures incentivadas e de debêntures de infraestrutura. Para além de exigir que os projetos de investimento incluíssem obrigatoriamente ações de implantação, ampliação, aquisição, reposição, manutenção, recuperação, adequação ou modernização de bens de capital, excluídas as ações de conservação, a política setorial ainda determinou que os projetos previssem investimentos em mitigação de emissões de gases de efeito estufa, transição energética e implantação e adequação de infraestrutura para aumento da resiliência climática, com vistas à adaptação às mudanças do clima e mecanismos de gestão do impacto da infraestrutura nos povos e comunidades afetados.

A ação do gestor público buscou atrelar o investimento em infraestrutura de transportes à sustentabilidade, de forma a mitigar riscos climáticos. Não é sem motivo o foco em descarbonização e adequação da infraestrutura para a resiliência climática, vez que essa ação pública se mostrou altamente necessária após os eventos do Rio Grande do Sul. Destaque-se que essa política não é voltada estritamente aos entes federais, mas abrange também os gestores de infraestruturas subnacionais.

No caso das rodovias, o requisito para o atendimento ainda estava conectado com a política lançada pela Portaria nº 622, de 28 de junho de 2024, que indica as regras para alocação de recursos em contratos de concessão rodoviária, visando ao desenvolvimento de infraestrutura resiliente, à mitigação das emissões de gases de efeito estufa (GEE) e à transição energética. Essa política conexa, que depois foi regulamentada pela Agência Nacional de Transportes Terrestres (ANTT), permite a alocação de 1% da receita bruta da concessão para o desenvolvimento de infraestrutura resiliente, com o objetivo de reduzir os impactos na infraestrutura rodoviária decorrentes das ameaças climáticas.

A política de emissão de debentures permite uma captação significativa de recursos, que, adicionado ao 1% da receita bruta da concessão previsto para alocação em infraestrutura resiliente, compõe fonte significativa de recursos disponíveis para investimentos na resiliência da infraestrutura rodoviária concedida. Denota não só a relevância que o Estado dá para o tema do risco climático, mas, ainda, o apoio material que está disposto a aplicar para que as infraestruturas rodoviárias do futuro sejam mais resistentes e hígidas em face das intempéries do clima.

Aponte-se, por fim, nessa política, que houve a atualização da Portaria MT nº 689/2024 pela Portaria MT nº 201, de 5 de março de 2025, que autoriza as concessionárias a recomprarem debentures emitidas para financiar obras, viabilizando a reemissão das debêntures e troca dos títulos por outros mais novos, com taxas de juros mais baixas. Visou-se, com isso, uma possibilidade de redução do custo de capital das concessões, reforçado a viabilidade dos projetos e o interesse dos investidores.

Do lado das políticas regulatórias, dois são os destaques que merecem ser expostos, por guardarem pertinência com os riscos climáticos: a dinâmica e os casos de reequilíbrio econômico-financeiro e o Programa de Sustentabilidade das rodovias e ferrovias federais, disposto pela Resolução ANTT nº 6.057, de 28 de novembro de 2024, que se baseou na diretriz indicada pela Portaria MT nº 622/2024, para alinhar o setor de infraestrutura terrestre às práticas modernas de sustentabilidade, enfrentando desafios ambientais, sociais e climáticos.

As revisões tarifárias e contratuais são mecanismos para reequilibrar o contrato de concessão às condições inicialmente pactuadas. Sua matéria é disciplinada no âmbito das rodovias concedidas pela Resolução ANTT nº 6.032, de 21 de dezembro de 2023. Enquanto mecanismos de reposição financeira ou aprimoramento contratuais (sobretudo para ajuste dos investimentos), constituem relevante ferramenta para adequação da infraestrutura para a resiliência climática.

O contrato de concessão será submetido às revisões ordinária, extraordinária e quinquenal, de acordo com o procedimento e as hipóteses de cabimento próprios. De seu lado, a revisão ordinária está relacionada a uma atualização tarifária que considera um incremento inflacionário, aplicação de fatores de antecipação e desconto, repactuações, entre outros, pouco relacionado com o tema do presente estudo. Por outro lado, tanto a revisão extraordinária quanto a quinquenal podem abrir relevante espaço para aporte de investimentos para resiliência climática. Ambas agem, contudo, em momentos diferentes, sendo uma mais voltada para a mitigação e outra, para a prevenção ou adaptação.

No caso da revisão extraordinária, seu gatilho de ativação reside na ocorrência de evento decorrente de caso fortuito, força maior, fato do príncipe ou fato da administração (o que engloba catástrofe climática), que tenha impacto significativo na operação da concessionária de rodovias. Portanto, seu caráter mitigador de eventos decorrentes de intempéries do clima se mostra bastante claro.

Para além disso, a Instrução Normativa (IN) ANTT nº 18, de 9 de março de 2023, também fez incluir, no escopo da revisão extraordinária, obras de segurança viária de caráter emergencial, em conformidade com o art. 12, do Decreto nº 10.648, de 12 de março de 2021, com o § 4º do art. 9º da Portaria MT nº 512, de 29 de abril de 2021, designando entre as intervenções cabíveis os investimentos para aumento da resiliência climática (art. 12, §2º, VI, da IN ANTT nº 18/2023). Nesse contexto, a revisão extraordinária também passou a ter um caráter preventivo em relação ao referido risco.

De outra sorte, nos termos do art. 154 da Resolução ANTT nº 6.032/2023, a revisão quinquenal será processada para aná-

lise da evolução do cumprimento das obrigações e da necessidade de atualização e modernização contratual. Seu escopo é bastante mais amplo e poderá envolver a inclusão, alteração, reprogramação ou exclusão de obras e serviços, a alteração de escopo, parâmetros técnicos e de desempenho e na atualização e modernização de quaisquer outros aspectos contratuais, objetivando a eficiência e aderência do contrato às necessidades dos usuários da rodovia. Conforme o montante envolvido, a revisão quinquenal pode vir a garantir uma antecipação de recursos, para assegurar a execução das obras e serviços previstos.

Assim, ambos mecanismos podem ser utilizados para atenuar os riscos climáticos, sendo certo que a revisão extraordinária já tem forte direcionamento para adaptação de infraestrutura para a resiliência climática.

Afinal, o Programa de Sustentabilidade para Infraestrutura de Rodovias e Ferrovias Federais reguladas pela ANTT, erigido pela Resolução ANTT nº 6.057/2024, trouxe parâmetros e índices de avaliação, mecanismos de implementação e incentivos composto por nove parâmetros de desempenho de sustentabilidade – PDS, quais sejam: i) PDS 1: Estabelecer Política de Sustentabilidade; ii) PDS 2: Dignidade do trabalhador; iii) PDS 3: Eficiência de Recursos e Prevenção da Poluição; iv) PDS 4: Saúde e Segurança da Comunidade; v) PDS 5: Aquisição de Terra e Reassentamento Involuntário; vi) PDS 6: Conservação do meio ambiente e da biodiversidade; vii) PDS 7: Comunidades Tradicionais; viii) PDS 8: Bens e Patrimônio Cultural; ix) PDS 9: Adaptação e resiliência da Infraestrutura; e x) Índice de Desenvolvimento da Sustentabilidade – IDS, para assegurar o desenvolvimento da infraestrutura de transporte terrestre alinhado à conservação do meio ambiente, à proteção da biodiversidade; à promoção da resiliência da infraestrutura frente às mudanças do clima e aos eventos climáticos extremos; ao fomento ao respeito à dignidade humana; e à manutenção da qualidade do serviço prestado no âmbito das rodovias e ferrovias federais concedidas. Com um representativo arcabouço de princípios e diretrizes, enunciou com instrumentos do programa os Parâmetros de Desempenho de Sustentabilidade (PDS), o Índice de Desenvolvimento da Sustentabilidade (IDS), sistemas de incentivos regulatórios e de

monitoramento e avaliação do Programa, bem como mecanismos de participação e controle social e de transparência e prestação de contas. Dessa maneira, constituiu o arcabouço que sustentará o Programa.

O Programa de Sustentabilidade para Infraestrutura de Rodovias e Ferrovias Federais é de adesão voluntária e poderá se dar em diferentes níveis, conforme o compliance da concessionária aos PDS indicados. A adesão, que depende da celebração de aditivos contratuais, quando atinge o Nível II, já abre possibilidade de reequilíbrio econômico-financeiro equivalente a 2% do impacto tarifário, o que materializa justamente o disposto na Portaria MT nº 622/2024 acima mencionada. No caso do enquadramento no Nível III serão, por sua vez, dimensionadas as obrigações contratuais assumidas, para se indicar o montante a ser reequilibrado, considerada a modicidade tarifária.

Nesse cenário, ressaltando-se que os PDS compõem ações para estabelecimento de políticas internas socioambientais, para mitigação de impacto nas comunidades afetadas e compromissos de atendimento a quesitos de responsabilidade ambiental, denota-se o enorme foco que a Agência atribuiu ao risco climático e sua mitigação. Utilizando-se do poderoso incentivo via mecanismo tarifário, a Agência tem o potencial de conseguir moldar o cenário da resiliência climática das infraestruturas de transportes, e, em especial, das rodovias concedidas, que podem ser as maiores beneficiadas por este Programa.

A adesão ao programa ainda assegura, nos termos do art. 25 da Resolução ANTT nº 6.057/2024, entre outros benefícios, reconhecimento público com a divulgação do IDS e classificação, condições diferenciadas para a celebração de termos de ajustamento de conduta (TAC) e para a aplicação do recurso de desenvolvimento tecnológico (RDT), além de tratamento diferenciado no procedimento de fiscalização. Consubstanciam-se, portanto, em condições muito diferenciadas para aqueles que investirem neste caminho da sustentabilidade.

Expostas às ações regulatórias, conforme apresentado no Quadro 1, cumpre avaliar quais resultados já podem ser observados dessas iniciativas e em que medida já se acena para um futuro

mais auspicioso quando se reflete sobre os investimentos em resiliência climática.

**Quadro 1:** Legislações e Ações Regulatórias

| **Legislações e Ações Regulatórias** | |
|---|---|
| **Lei nº 12.431, de 24 de junho de 2011** | Dispõe sobre a incidência do imposto sobre a renda em diversas operações, inclusive debêntures (debêntures incentivadas). |
| **Lei nº 14.801, de 9 de janeiro de 2024,** | Dispõe sobre as debêntures de infraestrutura; altera as Leis nºs 9.481, de 13 de agosto de 1997, 11.478, de 29 de maio de 2007, e 12.431, de 24 de junho de 2011. |
| **Decreto nº 11.964, de 26 de março de 2024** | Regulamenta os critérios e as condições para enquadramento e acompanhamento dos projetos de investimento considerados como prioritários na área de infraestrutura entre outras ações |
| **Portaria MT nº 622, de 28 de junho de 2024** | Estabelece diretrizes para alocação de recursos em contratos de concessão rodoviária visando ao desenvolvimento de infraestrutura resiliente, à mitigação das emissões de gases de efeito estufa (GEE) e à transição energética.<br>*"Os projetos de concessão rodoviária deverão manter a previsão de alocação de, no mínimo, 1% (um por cento) da receita bruta da concessão para o desenvolvimento de infraestrutura resiliente, com o objetivo de reduzir os impactos na infraestrutura rodoviária decorrentes das mudanças do clima."* |
| **Portaria MT nº 689, de 17 de julho de 2024** | Disciplina requisitos e procedimentos para enquadramento e acompanhamento de projetos de investimentos prioritários no setor de infraestrutura de transportes rodoviário e ferroviário para fins de emissão de debêntures incentivadas e de debêntures de infraestrutura |
| **Portaria MT nº 64, de 23 de janeiro de 2025** | Institui, no âmbito do Ministério dos Transportes, o Programa PRO-AdaptaVias.<br>*"Destinado à promoção da adaptação e do aumento da resiliência da infraestrutura federal de transportes terrestres frente à mudança do clima."* |
| **Portaria MT nº 201, de 5 de março de 2025** | Atualiza a Portaria MT nº 689/2024 |
| **Ações Regulatórias** | |
| **Instrução Normativa ANTT nº 18, de 9 de março de 2023** | Disciplina o procedimento do reajuste e das revisões ordinárias e extraordinárias no âmbito dos contratos de concessão de exploração de infraestrutura rodoviária sob gestão da Agência Nacional de Transportes Terrestres - ANTT.<br>*"Incluindo investimentos para aumento da Resiliência Climática"* |
| **Resolução ANTT nº 6.032, de 21 de dezembro de 2023** | Aprova a terceira norma do Regulamento das Concessões Rodoviárias, relativa à gestão econômico-financeira dos contratos de concessão de exploração de infraestrutura rodoviária sob competência da Agência Nacional de Transportes Terrestres. |
| **Resolução ANTT nº 6.057, de 28 de novembro de 2024** | Institui o Programa de Sustentabilidade para Infraestrutura de Rodovias e Ferrovias Federais Reguladas pela Agência Nacional de Transportes Terrestres - ANTT. |

Por outro lado, a elaboração de políticas públicas para adaptação e aumento da resiliência das rodovias sob gestão direta do Estado ainda não estão estabelecidas, sendo que o financiamento para execução de projetos e obras que contemplam tais adaptações ainda fica limitado à capacidade de investimento do País, que tem apresentado limitações severas anualmente.

## 4. RESULTADOS PRELIMINARES ALCANÇADOS

Expostas as políticas públicas setoriais e regulatórias, cumpre verificar sua suficiência para a mitigação dos riscos ou seu andamento, considerando o lapso temporal exíguo que se passou de sua criação até a finalização deste trabalho. Conquanto não haja tanto tempo para uma medição mais apurada dos efeitos das políticas, cumpre avaliar os benefícios trazidos pelo seu advento, considerando possível influência que já trouxeram em relação ao risco climático.

Em relação ao AdaptaVias, o relevante desdobramento que pode ser destacado se refere ao acompanhamento feito pelas autarquias federais responsáveis pelas infraestruturas rodoviárias e a constituição de plataforma para centralizar dados sobre riscos, vulnerabilidades e impactos climáticos. Com isso, se permitirá fomentar uma cultura de análise de risco climático, com vistas a assegurar a resiliência da infraestrutura federal de transportes terrestres frente às mudanças do clima. Isso exigirá tanto das autarquias federais quanto das autoridades locais não só o monitoramento atualizado das infraestruturas, mas, ainda, um conjunto de ações para a manutenção de suas condições, assim como ações preventivas, considerando a evolução das condições climáticas, o que poderá ser complementado por outros instrumentos regulatórios que se verá a seguir.

As debentures incentivadas e de infraestrutura foram bastante utilizadas pelas empresas concessionárias, como forma de captação de recursos para investimentos em descarbonização e resiliência climática. Conforme dados do Ministério dos Transportes, dispostos no Boletim de Instrumentos de Fomento de novembro de 2024[2], foram emitidos R$ 18,7 bilhões em debentures incentivadas,

2 Disponível em https://www.gov.br/transportes/pt-br/assuntos/incentivos/boletim-de-instrumentos-de-fomento

ao passo que foram aprovados e enquadrados para emissão mais de R$ 33 bilhões. Em comparação com os anos anteriores, houve um crescimento expressivo tanto de emissões (6 vezes maior) quanto de aprovações (3 vezes maior), o que mostra o sucesso da política quanto à sua canalização de recursos.

Valendo que seja futuramente medida a efetividade da aplicação dessas verbas em resiliência e descarbonização, a evolução dos valores emitidos em debêntures incentivadas e as regras apresentadas pela Portaria MT nº 689, de 17 de julho de 2024, que disciplina requisitos e procedimentos para enquadramento e acompanhamento de projetos de investimentos prioritários no setor de infraestrutura de transportes rodoviário para fins de emissão de debêntures incentivadas e de debêntures de infraestrutura, onde são destacados que os projetos de investimentos deverão prever investimentos em mitigação de emissões de gases de efeito estufa, transição energética ou implantação e adequação da infraestrutura para resiliência climática com vistas à adaptação às mudanças do clima.

As revisões extraordinárias e quinquenais constituem instrumentos bastante corriqueiros da gestão contratual das rodovias concedidas, e vêm sendo acionados com recorrência. Não obstante, não se identificou a mobilização de tais mecanismos para o caso das enchentes do Rio Grande do Sul, notadamente nas duas concessões federais em curso. Contudo, enquanto política regulatória nacional, nada impede que esse acionamento também se dê no âmbito de outras infraestruturas rodoviárias, em que se possa verificar a necessidade de aplicação de recursos para esse mister. Conquanto não tenham sido apuradas destinações neste sentido, não se pode indicar que a política não realizou seu direcionamento, ante o curto espaço de tempo que foi estabelecida. Vale que ainda seja acompanhado o cenário nacional, para que se possa ter um diagnóstico mais certeiro oportunamente.

Essa previsão regulatória incentiva a ação imediata das empresas concessionárias na recuperação do ativo danificado por eventos climáticos extremos, pois tem a ciência de que os recursos investidos serão objeto de reequilíbrio econômico-financeiro do contrato, após avaliação criteriosa por parte do poder concedente.

Nesse mesmo eixo de ação, conforme estabelecido na Portaria MT nº 622, de 28 de junho de 2024, as empresas concessionárias realizarão estudos de vulnerabilidade dos ativos sob sua gestão, indicando os locais mais críticos para adaptação e aplicação do valor de 1% (um por cento) da receita bruta da concessão para o desenvolvimento de infraestrutura resiliente, com o objetivo de reduzir os impactos na infraestrutura rodoviária decorrentes das mudanças do clima. Ressalte-se, contudo, que ainda resta pendente política pública dessa natureza para o setor ferroviário, o que seria um incentivo muito valioso para o desenvolvimento da referida infraestrutura em consonância com a sustentabilidade.

No caso do Programa de Sustentabilidade para Infraestrutura de Rodovias e Ferrovias Federais, ainda que tenha materializado expressivos incentivos para que as concessionárias venham a aderir a práticas mais sustentáveis, ainda não se registraram adesões além daquelas já consignadas nos contratos de concessão mais recentes. É fato que muitas daquelas práticas consolidadas nos PDS já estão presentes nas modelagens das outorgas mais recentes e se assentam como boa prática setorial. Como em alguns casos acima elencados, vale que se espere o amadurecimento da política setorial para que sejam medidos seus efeitos positivos.

## 5. CONCLUSÃO

O presente artigo teve por objetivo, a partir da catástrofe ocorrida no Estado do Rio Grande do Sul, discutir acerca das políticas públicas e regulatórias voltadas à mitigação do risco climático, sobretudo para as rodovias sob administração da iniciativa privada, por meio de concessões, já que políticas públicas para investimentos em rodovias sob administração direta do Estado são inexistentes. Cabe reconhecer que os eventos climáticos que se abateram sobre as 478 cidades daquele Estado tiveram uma enorme influência sobre os atos do Governo Federal, que se seguiram em 2024 e 2025.

Considerando uma significativa profusão de ações e a teoria do estudo das políticas públicas, foram selecionadas duas ações de Governo e duas ações regulatórias para descrição e avaliação quanto à sua eventual efetividade, a despeito do pouco tempo de

vigência. Com esse exercício, visou-se demonstrar o governo em ação, impulsionado pelos fatos, mas capaz de estabelecer uma agenda consciente e mobiliar meios para enfrentar as intempéries do clima, que tem se tornado cada vez mais frequentes e exigem uma ação positiva, sobretudo no que concerne à resiliência das infraestruturas de transportes. Na qualidade de ativos essenciais, que garantem abastecimento e mobilidade à sociedade, eles devem ser considerados como bens estratégicos a se proteger neste contexto de mudança do clima.

Foram examinados então, do lado das políticas públicas propriamente ditas, as diretrizes das debentures de infraestruturas e as incentivadas e o programa AdaptaVias. No primeiro caso, teve-se um mecanismo de fomento à captação de recursos a partir da adoção de práticas sustentáveis (critérios de elegibilidade para o programa), que gerou um significativo montante de emissão de debêntures e captação de recursos para os projetos da concessão, em grande parte direcionados à resiliência climática. No outro, estruturou-se um relevante levantamento e construção de um manual de referência que ainda deu origem a uma política voltada a um sistema de inteligência e monitoramento das infraestruturas. Também se criou um sistema de transparência e divulgação de informações, que poderá ser utilizado para outras políticas das mais distintas instâncias governamentais.

Sob a perspectiva regulatória, foram destacadas duas ações que detém notório diálogo com a prevenção e mitigação dos riscos climáticos, relacionados às revisões tarifárias e ao Programa de Sustentabilidade para Infraestrutura de Rodovias e Ferrovias Federais reguladas pela ANTT. Enquanto as revisões extraordinária e quinquenal tem o condão de mitigar e prevenir efeitos climáticos, pelo mecanismo da recomposição do equilíbrio econômico-financeiro, o Programa vem para incentivar as concessionárias de infraestruturas a aderirem a práticas sustentáveis, em alguns casos dando uma guinada em sua gestão em prol de um atendimento mais direto a questões ambientais, sociais e de governança. No mesmo sentido das políticas públicas, as ações regulatórias têm relevante direcionamento para dotar as infraestruturas de maior resiliência climática, além de assegurar aos gestores das conces-

sões uma condição mais favorável, caso optem por aderir a práticas mais sustentáveis.

Nesse sentido, há que se concluir que o Estado tem direcionado importantes políticas públicas no âmbito das rodovias federais concedidas para a mitigação dos riscos climáticos, com mudança de cultura e combate a antigas práticas de indiferença ambiental. Tais políticas, inclusive, tem contornos responsivos (AYRES E BRAITHWAITH, 1992), ao incentivarem as concessionárias a aderirem as melhores práticas da sustentabilidade, ao invés de ameaçá-las com sanções. Contudo, ainda não há elementos qualitativos suficientes para indicar se as políticas públicas e ações regulatórias são suficientes para mobilizar o setor de infraestrutura rodoviária para um patamar confiável de resiliência climática. O que já se pode afirmar, entretanto, é que há uma política de Estado em curso voltada para a estruturação de ações contínuas voltadas a mitigar, de forma preventiva ou reparadora, os riscos climáticos.

Porém, é fator primordial que estudos sobre metodologia de dimensionamento das infraestruturas de transportes terrestres, baseados em dados de modelos meteorológicos que possam apresentar as dimensões a serem consideradas nos projetos e execução das obras, sejam desenvolvidos, pois há risco de investimentos em adaptação, e consequente suposto aumento da resiliência, possam não ser suficientes para atender a demanda futura, obrigando a reconstrução de estruturas que já foram objeto de adaptação. Faz-se essencial, nessa linha, que futuros estudos qualitativos e quantitativos avaliem os resultados dessas políticas em curso para verificar que se os resultados obtidos coincidem com as intenções iniciais.

## REFERÊNCIAS

ANTT. AGÊNCIA NACIONAL DE TRANSPORTES TERRESTRES. **Resolução nº 6.057, de 28 de novembro de 2024**. Institui o Programa de Sustentabilidade para Infraestrutura de Rodovias e Ferrovias Federais Reguladas pela Agência Nacional de Transportes Terrestres - ANTT. Disponível em https://anttlegis.antt.gov.br/. Acesso em 15/07/2025.

ANTT. AGÊNCIA NACIONAL DE TRANSPORTES TERRESTRES. **Resolução nº 6.032, de 21 de dezembro de 2023**. Aprova a terceira norma do Regulamento das Concessões Rodoviárias, relativa à gestão econômico-financeira dos contratos de concessão de exploração de infraestrutura rodoviária sob competência da Agência Nacional de Transportes Terrestres. Disponível em https://anttlegis.antt.gov.br/. Acesso em 15/07/2025.

AYRES, I.; BRAITHWAITE, J. **Responsive Regulation: transcending the Deregulation Debate**. Oxford: Oxford University Press, 1992.

BANCO INTERAMERICANO DE DESENVOLVIMENTO (BID). **Avaliação dos efeitos e impactos das inundações no Rio Grande do Sul – Notas Técnicas nº IDB-TN-03039**. Brasília: Banco Mundial, 2024. Disponível em https://publications.iadb.org/pt/avaliacao-dos-efeitos-e-impactos-das-inundacoes-no-rio-grande-do-sul. Acesso em 15/07/2025.

BRASIL. **Lei nº 14.801, de 24 de junho de 2011**. Dispõe sobre as debêntures de infraestrutura; altera as Leis nºs 9.481, de 13 de agosto de 1997, 11.478, de 29 de maio de 2007, e 12.431, de 24 de junho de 2011; e dá outras providências. Diário Oficial da União. Brasília, DF: Presidência da República.

BRASIL. **Lei nº 12.431, de 9 de janeiro de 2024**. Dispõe sobre a incidência do imposto sobre a renda nas operações que especifica; institui o Regime Especial de Incentivos para o Desenvolvimento de Usinas Nucleares (Renuclear); dispõe sobre medidas tributárias relacionadas ao Plano Nacional de Banda Larga; altera a legislação relativa à isenção do Adicional ao Frete para Renovação da Marinha Mercante (AFRMM); dispõe sobre a extinção do Fundo Nacional de Desenvolvimento; e dá outras providências. Diário Oficial da União. Brasília, DF: Presidência da República.

BRASIL. **Decreto nº 11.964, de 26 de março de 2024**. Regulamenta os critérios e as condições para enquadramento e acompanhamento dos projetos de investimento considerados como prioritários na área de infraestrutura ou de produção eco-

nômica intensiva em pesquisa, desenvolvimento e inovação, para fins de emissão dos valores mobiliários de que tratam o art. 2º da Lei nº 12.431, de 24 de junho de 2011, e a Lei nº 14.801, de 9 de janeiro de 2024, e revoga o Decreto nº 8.874, de 11 de outubro de 2016. Diário Oficial da União. Brasília, DF: Presidência da República.

BRASIL. **Decreto nº 10.648, de 12 de março de 2021**. Institui a Política de Modernização da Infraestrutura Federal de Transporte Rodoviário - inov@BR e a qualifica no âmbito do Programa de Parcerias de Investimentos da Presidência da República. Diário Oficial da União. Brasília, DF: Presidência da República.

BRASIL. Ministério dos Transportes. **Portaria nº 201, de 5 de março de 2025**. Altera a Portaria MT/GM nº 689, de 17 de julho de 2024, que disciplina requisitos e procedimentos para enquadramento e acompanhamento de projetos de investimento prioritários no setor de infraestrutura de transportes rodoviário e ferroviário para fins de emissão de debêntures incentivadas e de debêntures de infraestrutura. Diário Oficial da União. Brasília, DF: Presidência da República.

BRASIL. Ministério dos Transportes. **Portaria nº 64, de 23 de janeiro de 2025**. Institui, no âmbito do Ministério dos Transportes, o Programa PRO-AdaptaVias. Diário Oficial da União. Brasília, DF: Presidência da República.

BRASIL. Ministério dos Transportes. **Portaria nº 689, de 17 de julho de 2024**. Estabelece os procedimentos e requisitos para o enquadramento de projetos de investimento prioritários nos setores rodoviário e ferroviário, visando a emissão de debêntures incentivadas e de infraestrutura. Diário Oficial da União. Brasília, DF: Presidência da República.

BRASIL. Ministério dos Transportes. **Portaria nº 512, de 29 de abril de 2021**. Institui o Programa de Modernização de. Rodovias Federais - inov@BR. Diário Oficial da União. Brasília, DF: Presidência da República.

BRASIL. Ministério dos Transportes. **Portaria nº 622, de 28 de junho de 2024**. Estabelece diretrizes para alocação de recursos em contratos de concessão rodoviária visando ao desenvolvi-

mento de infraestrutura resiliente, à mitigação das emissões de gases de efeito estufa (GEE) e à transição energética. Diário Oficial da União. Brasília, DF: Presidência da República.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES (DNIT). **Manual de Drenagem de Rodovias** – Publicação IPR 726. 2. ed. Rio de Janeiro: IPR, 2006.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES (DNIT). **Manual de Hidrologia Básica para Estruturas de Drenagem** – Publicação IPR 715. 2. ed. Rio de Janeiro: IPR, 2005.

DYE, Thomas D. **Understanding Public Policy**. Englewood Cliffs, N.J.: PrenticeHall. 1984.

HOWLETT, Michael; RAMESH, M; PERL, Anthony. **Política Pública: seus ciclos e subsistemas: uma abordagem integral**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2013.

3

# *PUBLIC POLICIES AND REGULATORY ACTIONS TO REDUCE CLIMATE RISKS IN BRAZIL'S ROAD ASSETS*

**FERNANDO BARBELLI FEITOSA,**
**FELIPE FERNANDES**
**E RICARDO LUIZ MEDEIROS MEIRELLES**

## *SUMMARY*

Climate Risks have always been a topic of attention for transport infrastructures. In 2025, the State of Rio Grande do Sul was impacted quite strongly by floods and flooding, directly affecting highways and railways. Public policies and regulatory actions play an essential role in encouraging the execution of actions aimed at adapting and increasing the resilience of road infrastructures. This article aims to present how recent public policies and regulatory actions in Brazil are evolving in order to enable public agents to face the impacts of climate change such as the ProAdaptaVias program, the regulation of incentivized debentures and the development of the Sustainability Program for Highway and Railroad Infrastructure granted.

**Keywords**

Infrastructure, highways, climate risks, public policies

DOI: 10.66949/a5r9w2c7

## INTRODUCTION

Road and rail infrastructure works are designed to meet historical climate standards, which even guide specific rules, such as the Highway Drainage Manual (DNIT, 2006) and the Basic Hydrology Manual for drainage structures (DNIT, 2005). However, global warming, mainly from the emission of greenhouse gases (GHG), has shown high variation, especially in the most recent hydrometeorological events, as recorded in Rio Grande do Sul in May 2024, demonstrating that the construction parameters based on historical data do not support the needs presented by climate events for the construction of a fully resilient infrastructure. In fact, the railway network of that state was 100% compromised, while the road network was greatly affected in its capacity (IDB, 2024).

The dimensioning of transportation infrastructures based on future events, whose current mathematical models are unable to precisely define the climate changes that may impact them, will require many technical-scientific studies and will be linked to the prognoses of these models. In this context, the recent arrangements of federal highway concession contracts, which in their structuring already consider the certainty of climate risk to establish actions to mitigate the impact on road interventions, guarantee mechanisms for the rapid restoration of infrastructures. Also of relevant importance are public policies that foster the resilience of infrastructures, especially AdaptaVias and incentivized and infrastructure debentures, among others.

These actions form a centralized package of knowledge and climate risk mitigation for transportation infrastructures. This study aims, using a descriptive and logical-inductive approach, to examine the public institutes made available to the highway concessions, to demonstrate their usefulness and possible pragmatic effects.

This discussion aims to show that, despite the solutions already implemented, there are still many actions that the Government can implement to adequately deal with extreme weather conditions, which tends to be more severe and increase risks for transport infrastructures. In fact, it is up to the State, together with its contractors, to enable bypass routes, that ensure the

resilience of its infrastructures and the continuity of the public service provided.

## The case of the State of Rio Grande do Sul

In May 2024, the State of Rio Grande do Sul was hit by the worst flood ever recorded, with rainfall far exceeding the capacity of existing infrastructure, affecting several municipalities and leaving 581,638 people homeless in the region (IDB, 2024). Despite the surprise of local authorities, it is a fact that floods had historically been recorded in the municipalities bordering the Uruguay River (IDB, 2024). However, the impacts on the road network of that state were devastating, and it was verified that the climatic intercurrence (rain and flood) caused a collapse of local and regional transport systems.

According to the BID (2024), 11,392 km of highways were affected to varying degrees by the floods, with damages estimated at over R$ 2 billion, including highways under public administration and concessions, of which approximately R$ 611 million correspond to the portion incurred by infrastructures managed by the private sector. Within the scope of federal highway concessions, it is worth noting that there are two road complexes comprising the BR-116/RS and BR-392/RS highways, concessioned to Ecovias Sul, and BR-101/290/336/448/RS, granted to Via Sul of the Motiva Group (formerly CCR Rodovias).

In fact, despite the fact that the federal infrastructures concessions were also severely affected by the aforementioned floods, the issue of climate risks and road infrastructures resilience was already the subject of contractual improvement and public policies. This movement is already a public response to the natural events that have been plaguing Brazil and the world, enabling concessioned road infrastructure to respond more quickly to such occasions.

Thus, the objective of this article is to demonstrate, based on the primary function of public policies and their derivation, regulatory policy, how federal highway concession contracts and climate resilience policies have evolved to increase resilience to the impacts of climate threats such as those that have devastated Rio Grande do

Sul. In this sense, we will start from this concept of public policies to analyze the actions of the government and regulatory and contractual instruments aimed at addressing this challenge.

## The role of Public Policies

According to the lessons of Howlett, Ramesh and Perl (2013), Public Policies are institutes that can be apprehensible by the combination of two or more scientific disciplines, among them, law, political science, economics and public administration, which focus on a qualified government action, in search of its structure, reasons and purposes. From a legal perspective, they are allocated in the field of Public Law, as the instrumentalization of a political will declared by the Legislative Branch or within the Executive Branch itself, not to mention any decision with a command to apply (or omit) in the face of the duty before a certain public policy (e.g., guarantee of public health). From a social science perspective, it is proposed as governmental action formulated by rational parameters and subject to analysis by researchers, historically conceived as tools for government decision-making.

Given this myriad of elements, public policy can be seen as state action aimed at meeting a social need, which takes the form of a political proposition and must be accompanied by a competent administrative process in its execution and transparency in its verification, in order to demonstrate the fulfillment of its objectives. In the field of research, it is necessary to understand both the *leitmotiv* that generated the idea (aimed at combating a problem that afflicts part or all of the population), which must be clearly identified with the domain of politics and its agents, as well as the possible discretion that involves its implementation process, since public agents are not guaranteed full freedom of means for its implementation, but rather guided by principles of public law.

It is worth noting that, in this dynamic process, Thomas Dye's (1984) concept of "government in action" is useful, as it allows us to isolate, in this kind of analysis, the primary public agent of *policy making*, the governmental decision (consisting of an action or omission in relation to an identified problem), as well as the

conscious deliberation of the Government in the direction indicated. This scenario also involves limitations of both the decision-maker and the executor, who do not have complete knowledge of the problem, nor of possible side effects that a given policy may generate. Perhaps one of the most emblematic examples of the undesirable results of public policy is that the fight against drug trafficking, which ended up influencing the formation of militias, especially in Rio de Janeiro.

Therefore, in its formation, it is necessary to respect the agenda-setting cycle, identifying alternatives, followed by evaluation and selection of options, for subsequent implementation and evaluation of the policy, so that the decision of the Public Power is based on rational criteria. It is useful to understand that *policy making*, even if formulated accidentally, constitutes a technical-political process based on certain criteria.

In this regard, there is a legal concern that public policy is not submitted to a traditional logic of the legal norm (hypothetical-conditional structure), but rather that it should be an end-means structure, since politics cannot simplify the norm, and the pursuit of objectives must be the real determinant of the action. From this perspective, administrative decisions must look to the future and, it should be emphasized, be based on quantitative and qualitative studies, in order to have a reasonable duration and produce effects.

Given this, the difficult definition of Public Policies necessarily involves the understanding that the Government, in its typical executing action, must meet some needs of its citizens, which constitutes a complex activity subject to the scrutiny by researchers.

Regulatory policy goes in the same direction as public policy, which is where it finds its fundamental rationale. It is based on public policy, as established by law or by the sectoral agenda, that the regulation begins to find its foundation, validity, and action, and can take shape in sectoral regulations.

In fact, climate risks have been, since the 1990s (ECO Rio 92), the subject of public and regulatory policies in various fields, especially from the perspective of prevention and mitigation of the

effects generated by global warming caused by high greenhouse gases (GHG) emission since the industrial revolution. Highways, considered in this context as infrastructures highly exposed to climate risks, require government measures that enable their rapid recovery in cases of damaged caused by extreme weather events, which is why the analysis of public policies and available regulatory actions is so essential.

## 3. TECHNICAL AND LEGAL INSTRUMENTS PUBLISHED BY BRAZIL

Among the instruments currently in force that address climate risks to road infrastructures, two public policies and two regulatory frameworks stand out. In both cases, there are government actions that mitigate the effects of climate risks or support their repair.

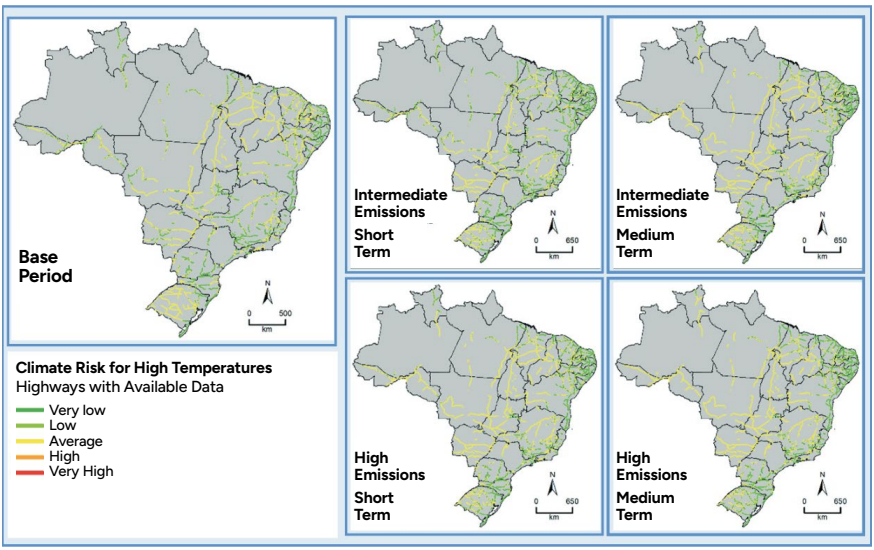
The first instrument worth highlighting is the Federal Program AdaptaVias, recently made public policy under the terms of MT Ordinance No. 64, of January 23, 2025. Called PRO-AdaptaVias, the program aims to promote adaptation and increase resilience of federal land transport infrastructure in face of climate change. Among the principles that guide this program, which provides for the development of the actions necessary for the implementation of the solution for intelligence, monitoring, management, registration and storage of climate change adaptation data in the federal land transport infrastructure (SIM-AdaptaVias), risk management and a focus on climate resilience are clearly indicated.

Initially, a survey was conducted on the impacts and risks of climate change on the federal land transport infrastructure, especially highways, aimed at supporting decisions to mitigate actions resulting from climate threats. The action, conducted by the Ministry of Transportation, was carried out in partnership with the *Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit GmbH* (GIZ), with support from the Ministry of Science, Technology and Innovation (Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações – MCTI) and the National Institute for Space Research (Instituto Nacional de

Pesquisas Espaciais – Inpe), and implemented by Gitec Brasil and the Transport Engineering Program of Coppe/UFRJ.

In this study[1], the following climate threats were considered: flooding; fires; landslides; erosion; and direct impacts of high temperatures. The study considered three time horizons: baseline (1981-2000), short term (2026-2045) and medium term (2046-2065). Intermediate and high emissions scenarios were also taken as a premise. Based on this data, the Climate Risk in Infrastructure (road and rail) due to climate threats was reached, with maps for each time horizon and emissions scenario. The risk of high temperatures impact according was also studied, according to the Survey of Climate Impacts and Risks on the existing Federal Land Transport Infrastructure, and the projection for highways is shown in the figure below.

**Figure 1:** Highway High Temperature Impact Risk Map

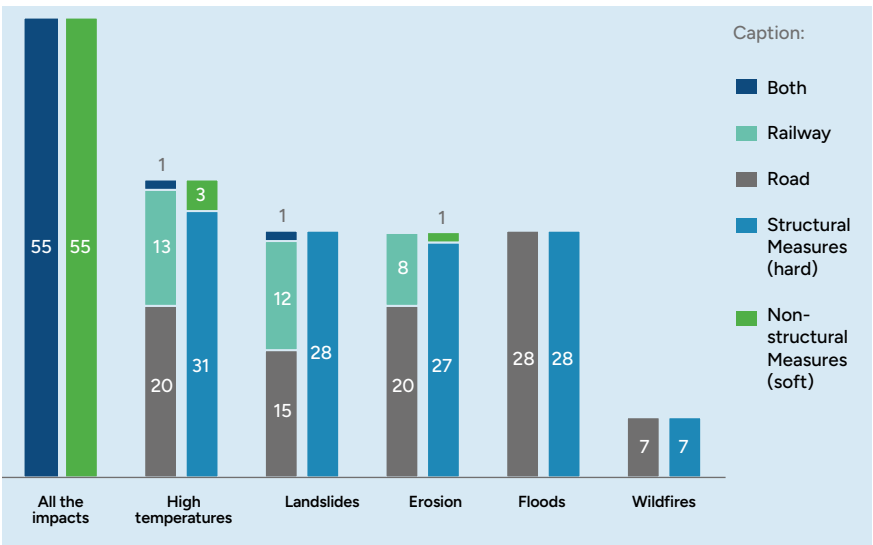



*Source: Survey of Climate Impacts and Risks on the existing and projected Federal Land Transport Infrastructure (Road and Rail). Available at https://www.gov.br/transportes/pt-br/assuntos/sustentabilidade/projeto-adaptavias. Accessed on 07/14/2025.*

1 Available at: https://www.gov.br/transportes/pt-br/assuntos/sustentabilidade/projeto-adaptavias

The survey results were made available on the website of the Ministry of Transport and include measures for adapting structural and non-structural infrastructures in road and rail transport (see figure 2). In addition to serving as a reference for action for subnational entities, a strategy was created to monitor these infrastructures at the federal level, capable of generating timely solutions so that the public management of highways can take corrective and preventive actions regarding climate disasters. As will be discussed in the results, monitoring should be carried out by different entities of the federation and generate a portal of useful public information for public managers, infrastructure users, and society.

**Figure 2:** Adaptation Measures by type of impact and classification of measures




*Source: Survey of Climate Impacts and Risks on the existing and projected Federal Land Transport Infrastructure (Road and Rail). Available at https://www.gov.br/transportes/pt-br/assuntos/sustentabilidade/projeto-adaptavias. Accessed on 07/14/2025.*

Another policy that is also closely related to climate risk is incentive and infrastructure debentures. Based on Law No. 14,801, of January 9, 2024, and its amendment in Law No. 12,431, of June 24, 2011, special purpose entities, concessionaires, licensees, autho-

rized entities, or lessees, incorporated as joint-stock companies, were authorized to issue debentures with tax benefits in the form of exemption or reduction of withholding income tax on income paid. This policy was further complemented by Decree No. 11,964, of March 26, 2024, which indicated the criteria and conditions for the classification and monitoring of investment projects considered to be priorities in the area of infrastructure.

Based on this minimum framework, the Ministry of Transport directed public policy under the terms of MT Ordinance No. 689, of July 17, 2024, to regulate requirements and procedures for the classification and monitoring of priority investment projects in the road and rail transport infrastructure sector, for the purpose of issuing incentive debentures and infrastructure debentures. In addition to requiring that investment projects mandatorily include actions for the implementation, expansion, acquisition, replacement, maintenance, recovery, adaptation, or modernization of capital goods, excluding conservation actions, the sectoral policy also determined that the projects should provide for investments in mitigation of greenhouse gas emissions, energy transition and implementation and adaptation of infrastructure to increase climate resilience, with a view to adapting to climate change and mechanisms for managing the impact of infrastructure on affected peoples and communities.

The public manager's action sought to link investment in transport infrastructure to sustainability, in order to mitigate climate risks. The focus on decarbonization and adapting infrastructure for climate resilience is not without reason, as this public action proved to be highly necessary after the events in Rio Grande do Sul. It should be noted that this policy is not strictly aimed at federal entities, but also covers subnational infrastructure managers.

In the case of highways, the requirement for compliance was still linked to the policy launched by Ordinance No. 622, of June 28, 2024, which indicated the rules for allocating resources in highway concession contracts, aimed at the development of resilient infrastructure, the mitigation of greenhouse gas (GHG) emissions, and the energy transition. This related policy, which

was later regulated by the National Land Transport Agency (ANTT), allows for the allocation of 1% of the gross revenue from the concession to the development of resilient infrastructure, with the objective of reducing the impacts on road infrastructure resulting from climate threats.

The debenture issuance policy allows for significant fundraising, which, added to the 1% of the gross revenue from the concession foreseen for allocation to resilient infrastructure makes up a significant source of funds available for investments in the resilience of the concessioned road infrastructure. This demonstrates not only the relevance that the State attaches to the issue of climate risk, but also the material support that it is willing to provide to ensure that the road infrastructure of the future is more resistant and resilient in the face of adverse weather conditions.

Finally, it should be noted in this policy, MT Ordinance No. 689/2024 was updated by MT Ordinance No. 201, of March 5, 2025, which authorizes concessionaires to repurchase debentures issued to finance works, enabling the reissuance of debentures and exchange of securities for newer ones, with lower interest rates. The aim was to reduce the cost of capital for concessions, thereby strengthening the viability of the projects and investors interest.

On the regulatory policy side, two highlights deserve mention, as they are relevant to climate risks: the dynamics and cases of economic and financial rebalancing and the Sustainability Program for federal highways and railways, established by by ANTT Resolution No. 6,057, of November 28, 2024, which was based on the guidelines indicated by MT Ordinance No. 622/2024, to align the terrestrial infrastructure sector with modern sustainability practices, addressing environmental, social and climate challenges.

Tariff and contractual revisions are mechanisms for rebalancing the concession contract to the conditions initially agreed upon. Their subject matter is regulated within the scope of the highways granted by ANTT Resolution No. 6,032, of December 21, 2023. As mechanisms for financial replacement or contractual improvement (especially for adjusting investments), they are an important tool for adapting infrastructure for climate resilience.

The concession contract will be submitted to ordinary, extraordinary and five-yearly reviews, in accordance with the appropriate procedure and circumstances. The ordinary review is related to a tariff update that considers inflationary increase, application of anticipation and discount factors, renegotiations, among others, which are not particularly relevant to the theme of this study. On the other hand, both the extraordinary and the five-yearly reviews can open up relevant space for investments in climate resilience. However, they operate at different times, with one focusing more on mitigation and the other on prevention or adaptation.

In the case of the extraordinary review, its activation trigger lies in the occurrence of an event resulting from unforeseeable circumstances, force majeure, acts of state, or act of the administration (which includes climate catastrophes) that have a significant impact on the operation of the highway concessionaire. Therefore, its mitigating nature in relation to events resulting from adverse weather conditions is quite clear.

In addition, Normative Instruction (IN) ANTT No. 18, of March 9, 2023, also included emergency road safety works in the scope of the extraordinary review, in accordance with article 12 of Decree No. 10,648, of March 12, 2021, with paragraph 4 of article 9 of MT Ordinance No. 512, of April 29, 2021, designating among the applicable interventions investments to increase climate resilience (art. 12, paragraph 2, VI, of IN ANTT No. 18/2023). In this context, the extraordinary review also took a preventive character in relation to the aforementioned risk.

On the other hand, pursuant to article 154 of ANTT Resolution No. 6,032/2023, the five-yearly review will be conducted to analyze the evolution of compliance with obligations and the need for contractual updates and modernization. Its scope is much broader and may involve the inclusion, alteration, rescheduling, or exclusion of works and services, the alteration of scope, technical and performance parameters, and the updating and modernization of any other contractual aspects, aiming at the efficiency and adherence of the contract to the needs of highway users. Depending on the amount involved, the five-yearly review may guarantee an

anticipation of resources to ensure the execution of the planned works and services.

Thus, both mechanisms can be used to mitigate climate risks, given that the extraordinary review already has a strong focus on adapting infrastructure for climate resilience.

After all, the Sustainability Program for Infrastructure of Federal Highways and Railways regulated by ANTT, established by ANTT Resolution No. 6,057/2024, introduced evaluation parameters and indexes, implementation mechanisms, and incentives composed of nine sustainability performance parameters (Parâmetros de Desempenho de Sustentabilidade – PDS), namely: i) PDS 1: Establish a Sustainability Policy; ii) PDS 2: Dignity of the worker; iii) PDS 3: Resource Efficiency and Pollution Prevention; iv) PDS 4: Community Health and Safety; v) PDS 5: Land Acquisition and Involuntary Resettlement; vi) PDS 6: Conservation of the environment and biodiversity; vii) PDS 7: Traditional Communities; viii) PDS 8: Cultural Assets and Heritage; ix) PDS 9: Infrastructure Adaptation and Resilience; and x) Sustainability Development Index (Índice de Desenvolvimento da Sustentabilidade – IDS), to ensure the development of land transport infrastructure in line with environmental conservation; biodiversity protection; the promotion of infrastructure resilience to climate change and climate events; the promotion of respect for human dignity; and the maintenance of the quality of the service on federal highways and railways under concession.. With a representative framework of principles and guidelines, it set out the Sustainability Performance Parameters (Parâmetros de Desempenho de Sustentabilidade – PDS), the Sustainability Development Index (Índice de Desenvolvimento da Sustentabilidade – IDS ), regulatory incentive systems, and monitoring and evaluation for the Program, as well as mechanisms for participation, social control, transparency, and accountability. In this way, it established the framework that will support the Program.

The Sustainability Program for Federal Highway and Railroad Infrastructure is voluntary and may be implemented at different levels, depending on the *concessionaire*'s compliance

with the indicated PDS. Adhesion, which depends on the signing of contractual amendments, when it reaches Level II, already opens the possibility of economic and financial rebalancing equivalent to 2% of the tariff impact, which materializes precisely the provisions of MT Ordinance No. 622/2024 mentioned above. In the case of Level III, the contractual obligations assumed will be assessed to indicate the amount to be rebalanced, considering the tariff modesty.

In this scenario, it should be noted that the SDPs comprise actions to establish internal socio-environmental policies, mitigate the impact on affected communities, and commit to meet environmental responsibility requirements, demonstrating the enormous focus that the Agency attributed to climate risk and its mitigation. Using the powerful incentive of the tariff mechanism, the Agency has the potential to shape the climate resilience scenario of transport infrastructure, particularly concessioned highways, which may benefit most from this Program.

Participation in the program also ensures, under the terms of article 25 of ANTT Resolution No. 6,057/2024, among other benefits, public recognition with the disclosure of the IDS and classification, differentiated conditions for the conclusion of conduct adjustment agreements (Termos de Ajustamento de Conduta – TAC) and for the application of the technological development resource (Recurso de Desenvolvimento Tecnológico – RDT), in addition to differentiated treatment in the inspection procedure. Therefore, there are very differentiated conditions for those who invest in this path of sustainability.

Having outlined the regulatory actions, as presented in Table 1, it is necessary to assess what results can already be observed from these initiatives and to what extent there are signs of a more auspicious future when reflecting on investments in climate resilience.

**Table 1:** Legislation and Regulatory Actions.

| Legislation and Regulatory Actions | |
|---|---|
| **Law No. 12,431, of June 24, 2011** | Provides for the incidence of income tax on various transactions, including debentures (incentivized debentures). |
| **Law No. 14,801, of January 9, 2024,** | Provides for infrastructure debentures; amends Laws No. 9,481, of August 13, 1997, 11,478, of May 29, 2007, and 12,431, of June 24, 2011. |
| **Decree No. 11,964, of March 26, 2024** | Regulates the criteria and conditions for the classification and monitoring of investment projects considered to be priorities in the area of infrastructure, among other actions |
| **MT Ordinance No. 622, of June 28, 2024** | Establishes guidelines for the allocation of resources in highway concession contracts aimed at the development of resilient infrastructure, the mitigation of greenhouse gas (GHG) emissions, and the energy transition.<br>*"Highway concession projects must maintain the forecast of allocating at least 1% (one percent) of the gross revenue from the concession to the development of resilient infrastructure, with the objective of reducing the impacts on road infrastructure resulting from climate change."* |
| **MT Ordinance No. 689, of July 17, 2024** | Regulates requirements and procedures for the classification and monitoring of priority investment projects in the road and rail transport infrastructure sector for the purpose of issuing incentivized debentures and infrastructure debentures |
| **MT Ordinance No. 64, of January 23, 2025** | Establishes, within the scope of the Ministry of Transport, the PRO-AdaptaVias Program.<br>*"Aimed at promoting adaptation and increasing the resilience of federal land transport infrastructure in the face of climate change."* |
| **MT Ordinance No. 201, of March 5, 2025** | Updates MT Ordinance No. 689/2024 |
| **Regulatory Actions** | |
| **ANTT Normative Instruction No. 18, of March 9, 2023** | Regulates the readjustment procedure and ordinary and extraordinary reviews within the scope of concession contracts for the exploration of road infrastructure under the management of the National Land Transport Agency (Agência Nacional de Transportes Terrestres – ANTT).<br>*"Including investments to increase Climate Resilience"* |
| **ANTT Resolution No. 6,032, of December 21, 2023** | Approves the third rule of the Highway Concessions Regulation, related to the economic and financial management of concession contracts for the exploration of highway infrastructure under the competence of the National Land Transport Agency. |
| **ANTT Resolution No. 6,057, of November 28, 2024** | Establishes the Sustainability Program for Infrastructure of Federal Highways and Railways Regulated by the ANTT. |

On the other hand, the elaboration of public policies for adaptation and increase the resilience of highways under direct management by the State have not yet been established, and funding for projects and works that include such adaptations is still limited to the country's investment capacity, which has been severely constrained on an annual basis.

## 4. PRELIMINARY RESULTS ACHIEVED

Having outlined the sectoral and regulatory public policies, it is necessary to verify their adequacy for the mitigation of risks or their progress, considering the short time that has elapsed from their creation to the completion of this work. Although there is not enough time for a more accurate measurement of the effects of policies, it is necessary to evaluate the benefits brought about by their advent, understanding the possible influence they have already had in relation to climate risk.

In relation to AdaptaVias, the relevant development that can be highlighted refers to the monitoring carried out by the federal agencies responsible for road infrastructures and the constitution of a platform to centralize data on risks, vulnerabilities and climate impacts. This will foster a culture of climate risk analysis, with a view to ensuring the resilience of the federal land transport infrastructure in the face of climate change. This will require both federal and local authorities not to only monitor infrastructures on an ongoing basis, but also to take a series of measures to maintain its conditions, as well as preventive measures, considering the evolution of climatic conditions, which may be complemented by other regulatory instruments, as discussed below.

Incentivized and infrastructure debentures were widely used by concessionaires as a way to raise funds for investments in decarbonization and climate resilience. According to data from the Ministry of Transport, available in the November 2024 Development Instruments Bulletin[2], R$ 18.7 billion in incentive debentures were issued, while more than R$ 33 billion were approved and quali-

2 Available at: https://www.gov.br/transportes/pt-br/assuntos/incentivos/boletim-de-instrumentos-de-fomento

fied for issuance. Compared to previous years, there was a significant growth in both issuances (6 times higher) and approvals (3 times higher), which shows the success of the policy in channeling of resources.

It is important that the effectiveness of the application of these funds in resilience and decarbonization be measured in the future, the evolution of the amounts issued in incentive debentures and the rules presented by MT Ordinance No. 689, of July 17, 2024, which regulates requirements and procedures for the classification and monitoring of priority investment projects in the road transport infrastructure sector for the purpose of issuing incentive debentures and infrastructure debentures, which highlights that investment projects must provide for investments in mitigation of greenhouse gas emissions, energy transition, or the implementation and adaptation of infrastructure for climate resilience with a view to adapting to climate change.

Extraordinary and five-yearly reviews are very common instruments of the contractual management of concession highways, and have been used repeatedly. Nevertheless, the mobilization of such mechanisms has not been identified for the case of floods in Rio Grande do Sul yet, notably in the two federal concessions currently in place. However, as a national regulatory policy, nothing prevents this mechanism from also being used within the scope of other road infrastructures, where the need to apply resources for this purpose can be verified. Although no allocations have been made in this regard, it cannot be said that the policy has not achieved its objective, given the short time it has been in place. It is worth monitoring the national scenario in order to obtain a more accurate diagnosis in due course.

This regulatory provision encourages immediate action by concessionaires to recover assets damaged by extreme weather events, as they know that the resources invested will be subject to economic and financial rebalancing of the contract, after careful evaluation by the granting authority.

Along the same lines, as established in MT Ordinance No. 622, of June 28, 2024, concessionaires will conduct vulnerability studies of the assets under their management, indicating the most

critical locations for adaptation and application of the value of 1% (one percent) of the gross revenue of the concession to the development of resilient infrastructure, with the aim of reducing the impacts on road infrastructure resulting from climate change. It should be noted, however, that a public policy of this nature for the railway sector is still pending, which would be a very valuable incentive for the development of this infrastructure in line with sustainability.

In the case of the Sustainability Program for Infrastructure of Federal Highways and Railways, although it has provided significant incentives for concessionaires to adopt more sustainable practices, there have not been no new signatories beyond those already set out in the most recent concession contracts. It is a fact that many of those practices consolidated in the PDS are already present in the models of the most recent concession models and are established as good sectoral practice. As in some cases listed above, it is worth waiting for the maturation of the sectoral policy to measure its positive effects.

## 5. CONCLUSION

The objective of this article was to discuss, based on the catastrophe that occurred in the state of Rio Grande do Sul, public and regulatory policies aimed at mitigating climate risk, especially for highways under private management through concessions, since public policies for investments in highways under direct administration of the State are non-existent. It is worth recognizing that the climatic events that hit the 478 cities of that state had an enormous influence on the acts of the Federal Government, which followed in 2024 and 2025.

Considering the significant profusion of actions and the theory of the study of public policies, two Government actions and two regulatory actions were selected for description and evaluation in terms of their potential effectiveness, despite the short time they have been in force. The aim of this exercise was to demonstrate the government in action, driven by the facts, but capable of establishing a conscious agenda and mobilizing resources to face the

increasingly frequent climate disturbances, that requires positive action, especially with regard to the resilience of transport infrastructure. As essential assets that guarantee supply and mobility to society, they should be considered as strategic assets to be protected in this context of climate change.

Then, on the public policy side, the guidelines of the infrastructure debentures and the incentives and the AdaptaVias program were examined. In the first case, there was a mechanism to promote fundraising through the adoption of sustainable practices (eligibility criteria for the program), which generated a significant amount of debenture issuance and fundraising for the concession projects, largely directed at climate resilience. In the other case, a relevant survey and construction of a reference manual was developed, which also gave rise to a policy focused on an intelligence and monitoring system for infrastructures. A system for transparency and disclosure of information was also created, which can be used for other policies from a wide range of government agencies.

From a regulatory perspective, two actions were highlighted that are closely linked to prevention and mitigation of climate risks, related to tariff reviews and the Sustainability Program for Infrastructure of Federal Highways and Railways regulated by ANTT. While the extraordinary and five-yearly reviews have the power to mitigate and prevent climate effects through the mechanism of restoring the economic and financial balance, the Program encourages infrastructure concessionaires to adopt sustainable practices, in some cases taking a turn in their management in favor of a more direct response to environmental, social and governance issues. In line with public policies, regulatory actions are aimed at making infrastructure more climate-resilient, as well as ensuring concession managers a more favorable condition, if they choose to adopt more sustainable practices.

In this sense, it must be concluded that the State has directed important public policies within the scope of federal highways under concession to mitigate climate risks, changing the culture and combating old practices of environmental indifference. Such policies even have responsive contours (AYRES AND BRAITHWAITH, 1992), encouraging concessionaires to adhere to best sustainability

practices, instead of threatening them with sanctions. However, there are still not enough qualitative elements to indicate whether public policies and regulatory actions are sufficient to mobilize the road infrastructure sector to a reliable level of climate resilience. What can already be said, however, is that there is an ongoing State policy aimed at structuring continuous actions aimed at mitigating, in a preventive or reparative manner, climate risks.

However, it is essential that studies on the methodology for dimensioning land transport infrastructures, based on meteorological model data that can present the dimensions to be considered in the design and execution of works, be developed, as there is a risk that investments in adaptation, and consequent supposed increase in resilience, may not be sufficient to meet future demand, forcing the reconstruction of structures that have already been adapted. In this regard, it is essential, that future qualitative and quantitative studies evaluate the results of these ongoing policies to verify whether the results obtained coincide with the initial intentions.

## *REFERENCES*


ANTT. NATIONAL LAND TRANSPORT AGENCY. **Resolution No. 6,057, of November 28, 2024.** Establishes the Sustainability Program for Infrastructure of Federal Highways and Railways Regulated by the National Land Transportation Agency - ANTT. Available at https://anttlegis.antt.gov.br/. Accessed on 07/15/2025.

ANTT. NATIONAL LAND TRANSPORT AGENCY. **Resolution No. 6,032, of December 21, 2023.** Approves the third rule of the Highway Concessions Regulation, related to the economic and financial management of concession contracts for the exploration of highway infrastructure under the competence of the National Land Transport Agency. Available at https://anttlegis.antt.gov.br/. Accessed on 07/15/2025.

AYRES, I.; BRAITHWAITE, J. **Responsive Regulation: transcending the Deregulation Debate**. Oxford: Oxford University Press, 1992.

INTER-AMERICAN DEVELOPMENT BANK (IDB). **Assessment of the effects and impacts of floods in Rio Grande do Sul – Technical Notes No. IDB-TN-03039**. Brasilia: World Bank, 2024. Available in https://publications.iadb.org/pt/avaliacao-dos-efeitos-e-impactos-das-inundacoes-no-rio-grande-do-sul. Accessed on 07/15/2025.

BRAZIL. **Law No. 14,801, of June 24, 2011**. Provides for infrastructure debentures; amends Laws No. 9,481, of August 13, 1997, 11,478, of May 29, 2007, and 12,431, of June 24, 2011; and makes other provisions. Official Gazette of the Union. Brasília, DF: Presidency of the Republic.

BRAZIL. **Law No. 12,431, of January 9, 2024**. Provides for the incidence of income tax on the operations it specifies; institutes the Special Incentive Regime for the Development of Nuclear Power Plants (Renuclear); provides for tax measures related to the National Broadband Plan; amends the legislation regarding the exemption of the Additional Freight for the Renewal of the Merchant Marine (AFRMM); provides for the extinction of the National Development Fund; and makes other provisions. Official Gazette of the Union. Brasília, DF: Presidency of the Republic.

BRAZIL. **Decree No. 11,964, of March 26, 2024**. Regulates the criteria and conditions for the classification and monitoring of investment projects considered to be priorities in the area of infrastructure or intensive economic production in research, development and innovation, for the purpose of issuing the securities referred to in article 2 of Law No. 12,431, of June 24, 2011, and Law No. 14,801, of January 9, 2024, and revokes Decree No. 8,874, of October 11, 2016. Official Gazette of the Union. Brasília, DF: Presidency of the Republic.

BRAZIL. **Decree No. 10,648, of March 12, 2021**. Establishes the Policy for the Modernization of the Federal Road Transport Infrastructure - inov@BR and qualifies it within the scope of the Investment Partnerships Program of the Presidency of the Republic. Official Gazette of the Union. Brasília, DF: Presidency of the Republic.

BRAZIL. Ministry of Transport. **Ordinance No. 201, of March 5, 2025**. Amends MT/GM Ordinance No. 689, of July 17, 2024, which regulates requirements and procedures for the classification and monitoring of priority investment projects in the road and rail transport infrastructure sector for the purpose of issuing incentivized debentures and infrastructure debentures. Official Gazette of the Union. Brasília, DF: Presidency of the Republic.

BRAZIL. Ministry of Transport. **Ordinance No. 64, of January 23, 2025**. Establishes, within the scope of the Ministry of Transport, the PRO-AdaptaVias Program. Official Gazette of the Union. Brasília, DF: Presidency of the Republic.

BRAZIL. Ministry of Transport. **Ordinance No. 689, of July 17, 2024**. Establishes the procedures and requirements for the classification of priority investment projects in the road and rail sectors, aiming at the issuance of incentivized debentures and infrastructure. Official Gazette of the Union. Brasília, DF: Presidency of the Republic.

BRAZIL. Ministry of Transport. **Ordinance No. 512, of April 29, 2021**. Establishes the Modernization Program of. Federal Highways - inov@BR. Official Gazette of the Union. Brasília, DF: Presidency of the Republic.

BRAZIL. Ministry of Transport. **Ordinance No. 622, of June 28, 2024**. Establishes guidelines for the allocation of resources in highway concession contracts aimed at the development of resilient infrastructure, the mitigation of greenhouse gas (GHG) emissions, and the energy transition. Official Gazette of the Union. Brasília, DF: Presidency of the Republic.

NATIONAL DEPARTMENT OF TRANSPORT INFRASTRUCTURE (DNIT). **Highway Drainage Manual** – IPR Publication 726. 2. ed. Rio de Janeiro: IPR, 2006.

NATIONAL DEPARTMENT OF TRANSPORT INFRASTRUCTURE (DNIT). **Manual of Basic Hydrology for Drainage Structures** – IPR Publication 715. 2. ed. Rio de Janeiro: IPR, 2005.

DYE, Thomas D. **Understanding Public Policy**. Englewood Cliffs, N.J.: PrenticeHall. 1984.

HOWLETT, Michael; RAMESH, M; PERL, Anthony. **Public Policy: its cycles and subsystems: an integral approach**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2013.

4

# REASSENTAMENTO EM ÁREAS DE RISCO E MUDANÇAS CLIMÁTICAS: O CASO DA VILA BOM DESTINO ( BR-381/MG)

LEANDRO EUSTÁQUIO TITO MUNIZ

## RESUMO

Este capítulo discute os desafios e estratégias de reassentamento em áreas de risco associadas às obras de infraestrutura de transportes, destacando o caso da Vila Bom Destino, na BR-381/MG, e os impactos das mudanças climáticas sobre essas populações vulneráveis. Apresenta as diretrizes do DNIT, as modalidades de atendimento e as lições aprendidas em acordos judiciais anteriores, ressaltando a importância da adaptação climática e da resiliência social no contexto das obras públicas. O reassentamento tratado neste capítulo será realizado no âmbito do Acordo Judicial a ser celebrado entre o Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, a Prefeitura Municipal de Belo Horizonte, o Ministério Público Federal, e a Defensoria Pública da União, no âmbito da Ação Civil Pública nº 0057367.09.2013.4.01.3800. O acordo visa estabelecer os procedimentos para o reassentamento e a compensação monetária dos ocupantes socioeconomicamente vulneráveis da faixa de domínio dos Lotes 8A e 8B da BR-381/MG/Norte, trecho entre Caeté e Belo Horizonte/MG.

### Palavras-chave

Reassentamento, áreas de risco e infraestrutura de transportes

DOI: 10.66949/m4z8k1d3

# INTRODUÇÃO

A rodovia BR-381/MG Norte, trecho entre Governador Valadares e Belo Horizonte, é considerada uma das rodovias mais perigosas para os usuários no Brasil, muitas vezes chamada de rodovia da morte. O trecho rodoviário possui 303 km de extensão, sendo a maior parte em pista única e implantada em relevo montanhoso. A duplicação desse trecho rodoviário é uma demanda antiga e constante da população de Minas Gerais, especialmente pelo elevado número de acidentes, muitas vezes fatais (FERREIRA, FARIA e FONSECA, 2012).

O Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes - DNIT iniciou os projetos de duplicação da BR-381/MG Norte em 2007 e, após a obtenção da Licença Prévia, em 2010, deu início ao processo de licitação das obras por meio de contratação integrada, nos anos de 2013 e 2014. O DNIT obteve a Licença de Instalação em março de 2014, tendo como um dos programas ambientais o Programa de Desapropriação e Reassentamento, que tem por objetivo realizar a remoção das famílias de forma humanizada.

Em que pese o DNIT ter licitado as obras nos lotes 01 ao 07, por diversos fatores, as obras não caminharam conforme o esperado. Apenas as obras dos lotes 3.1, 3.2, 3.3 e 07 foram praticamente concluídas. Os lotes 08A e 08B não chegaram a ter as obras contratadas, muito em função do desinteresse do mercado nesse empreendimento, pela necessidade de remoção de muitas famílias. Nos anos de 2021 e 2022, o Ministério da Infraestrutura tentou conceder a rodovia BR-381 à iniciativa privada, mas não teve sucesso. O Ministério dos Transportes repetiu a tentativa em 2023 e, mais uma vez, não obteve êxito.

No início de 2024, houve a decisão do Ministério dos Transportes de alterar o projeto de concessão da BR-381/MG trecho Norte, com exclusão da obrigação das obras dos lotes 08A e 08B da futura concessionária. Com essa decisão, o DNIT ficou responsável pelas obras de duplicação dos lotes 08A e 08B, que correspondem ao trecho entre Caeté e Belo Horizonte, com extensão total de 31 km. Conforme contrato de concessão, as obras precisam ser entregues pelo DNIT até o oitavo ano de concessão.

O referido trecho é considerado o de maior complexidade para o início das obras, em função da intensa ocupação irregular da faixa de domínio da rodovia BR-381/MG, especialmente por famílias vulneráveis socioeconomicamente, o que implica num processo de reassentamento desses ocupantes. A faixa de domínio da BR-381/MG é delimitada pela porção de terras de 40 metros para cada lado do eixo da rodovia, ou seja, em relação à faixa de divisão das pistas. No município de Belo Horizonte, a faixa de domínio é de 25 metros.

Importante destacar que em 28 de outubro de 2013, o Ministério Público Federal (MPF) e a Defensoria Pública da União (DPU), em litisconsórcio, ajuizaram a Ação Civil Pública (ACP) nº 5736709.2013.4.01.3800. Essa ACP tem como objetivo garantir que a população de baixa renda que mora em áreas próximas à rodovia BR-381/MG-Norte, e que será atingida pelas obras, tenham seus direitos respeitados no processo de remoção.

Em novembro de 2014, o MPF, a DPU, a União, a Caixa Econômica Federal e o DNIT celebraram o primeiro Acordo Judicial para o reassentamento de famílias vulneráveis socioeconomicamente da faixa de domínio da BR-381 Norte. Em 2017, MPF, DPU, Urbel e DNIT firmaram o Termo de Acordo nº 01/2017, para o reassentamento das Vilas da Paz, Pica Pau, Luz e Bom Destino, sendo o reassentamento dividido em duas etapas, com a primeira etapa composta pelas Vilas da Paz e Pica Pau e a segunda etapa pelas Vilas da Luz e Bom Destino.

O reassentamento da Vila Bom Destino sempre foi uma demanda do município de Santa Luzia para o DNIT, em função dos riscos geológicos para as moradias construídas no talude de corte da rodovia BR-381/MG. A ocupação dos taludes da rodovia BR-381/MG por construções irregulares é um risco para os moradores e para a estabilidade da rodovia, especialmente no período chuvoso. Num cenário em que o período chuvoso vem registrando chuvas acima da média em funções das mudanças climáticas, o risco torna-se ainda maior. Reassentar as famílias que ocupam atualmente as áreas de risco é uma medida de adaptação da rodovia BR-381/MG, com foco na segurança dos moradores e dos usuários da rodovia.

Assim, este capítulo apresenta as medidas adotadas pelo DNIT até o momento para viabilizar o reassentamento de famílias

ocupantes da faixa de domínio da BR-381/MG. Reassentamento esse necessário para permitir as obras de duplicação da rodovia e para mudar a vida de famílias que vivem hoje em áreas de risco, numa situação cada vez mais crítica em função das mudanças climáticas. Este capítulo está estruturado em dois subitens, que apresentam o Acordo Judicial em construção para definir as regras do reassentamento e as ações já realizadas no caso específico da Vila Bom Destino, no município de Santa Luzia/MG.

## A CONSTRUÇÃO DO NOVO ACORDO JUDICIAL DE REASSENTAMENTO PARA OS LOTES 08A E 08B DA BR-381/MG

O DNIT concluiu, neste ano de 2025, a primeira etapa do reassentamento que contemplava as Vilas da Paz e Pica Pau, além de outros reassentamentos prioritários determinados pela justiça federal. Para o início da segunda etapa, verificou-se a necessidade de revisão do Termo de Acordo nº 01/2017, tendo em vista a necessidade de incluir outras ocupações, bem como em função de alterações realizadas no acordo original, como, por exemplo, o Termo de Acordo nº 01/2020, que havia retirado a Vila Bom Destino das obrigações do DNIT. Contudo, como os lotes 08A e 08B foram excluídos da concessão, o reassentamento da Vila Bom Destino retornou para o DNIT.

Assim, faz-se necessária a celebração de um novo Acordo Judicial entre as partes. O objetivo central é o reassentamento e a compensação monetária de ocupantes vulneráveis na faixa de domínio da BR-381/MG/Norte e Anel Rodoviário de Belo Horizonte, especificamente no trecho entre Caeté e Belo Horizonte. O acordo representa a fase 2 do Programa Judicial Concilia BR-381 e Anel Rodoviário.

Neste momento, faz-se relevante contextualizar a criação do Programa Judicial Concilia BR-381 e Anel Rodoviário. Conforme informado, MPF e DPU ajuizaram uma Ação Civil Pública, que tramitou na 7ª Vara Federal da Seção Judiciária de Minas Gerais. A Juíza titular e responsável pela criação do Programa Concilia, Dra. Dayse Starling Motta, descreveu em sua dissertação sobre o início do feito da seguinte forma:

> "*Diante do déficit habitacional, da lentidão dos poderes públicos municipais em desenvolver e executar programas habitacionais em contraponto com a forte pressão e mobilização social, demonstradas por meio as inúmeras invasões de terrenos públicos e privados, e com a certeza de que este não é um problema de polícia, se desenvolve um programa de remoção e reassentamento humanizados.*
>
> *Desse modo, o Poder Judiciário assume a condução do processo, desenvolvendo um sistema para a solução do litígio que envolve as ocupações existentes às margens do Anel Rodoviário de BH e BR381/Norte, com a criação de um Programa Judicial de Conciliação para remoção e reassentamento humanizados das famílias socioeconomicamente vulneráveis, norteado pela garantia e efetividade dos direitos humanos*" (MOTTA, 2016, *p* 13).

É importante frisar que o déficit habitacional de Belo Horizonte é considerável, o que leva as constantes ocupações de imóveis públicos e privados, que no fim acabam em remoções forçadas. Como bem aponta Motta (2016, p.13):

> "*É preciso equacionar o problema na sua gênese: desconsideração do direito à cidade e do imprescindível cumprimento das suas funções sociais, e, por consequência, ausência de políticas públicas de geração de emprego e renda e habitacional, consistentes e nos volumes necessários, a fim de assegurar a efetivação de direitos humanos fundamentais.*

As famílias ocupantes da faixa de domínio da BR-381/MG Norte não estão ali por opção, mas pela negação do direito a cidade a essas famílias. As ocupações irregulares são um reflexo da ausência de políticas públicas direcionadas aos mais vulneráveis. Assim, nas remoções forçadas para obras de infraestrutura, faz-se necessário considerar as funções sociais da cidade e os impactos na cidade do empreendimento. Cabe ao DNIT compreender a dinâmica das famílias a serem reassentadas, estimadas em quase 2 mil grupos familiares.

O desafio de recadastrar, remover e reassentar esse volume de famílias dentro do cronograma das obras é significativo para o DNIT. Um entendimento comum para a segunda etapa do reassen-

tamento é que a metodologia de aquisição de moradias deve ser preferencialmente coletiva, por meio do Programa Minha Casa Minha Vida. A aquisição individual (compra assistida) funcionaria como exceção, devido ao volume estimado de reassentamentos. Contudo, a implementação do modelo coletivo exige mais tempo e planejamento, tornando provável que, no início das obras, seja necessária a atuação no modelo individual e até mesmo de abrigamento provisório. Outra possibilidade é a compensação monetária para as famílias que assim desejarem.

Observa-se que as três modalidades foram definidas a partir de diretrizes do DNIT, conforme normativos internos, e debatidas no âmbito judicial, com a participação de MPF e DPU, além das famílias. O envolvimento das famílias afetadas foi promovido por meio de reuniões comunitárias e acompanhamento social, realizado em parceria com os municípios. As três modalidades de reassentamento pretendidas na segunda etapa podem ser assim descritas:

- Reassentamento Coletivo: Construção de unidades habitacionais. Esta modalidade é preferencial para famílias localizadas em aglomerados de ocupação (vilas, bairros). Será realizada em parceria com os municípios e a União (Ministério das Cidades), com contribuição do DNIT. Cabe aos municípios a destinação de terrenos, construção de unidades e equipamentos públicos;
- Reassentamento Individual: Compra assistida de imóveis disponíveis no mercado local. Essa modalidade é preferencial para ocupações isoladas, em função do atendimento individualizado. Para o Lote 8A, será a modalidade inicial, dada a dispersão das ocupações, o tempo estimado para o modelo coletivo, o cronograma das obras e a existência de recursos;
- Compensação Monetária (Financeira): Pagamento de um valor em dinheiro. Aplicável quando a família manifesta interesse, seguindo formalidades específicas.

Caso não seja possível aplicar imediatamente uma das modalidades principais, poderá ser realizado o abrigamento provisório com pagamento de “aluguel social” às famílias, por meio dos sistemas existentes nos municípios. Essa é uma medida que visa

atender às famílias em áreas de maior risco geológico e em áreas prioritárias de obras. O aluguel social é ferramenta importante para atender as famílias em situação de maior vulnerabilidade ao clima, especialmente aquelas que ocupam áreas de maior risco.

Importante ressaltar que o DNIT possui normativos de reassentamento, especialmente a Instrução Normativa nº 56/2021 e o documento Diretrizes dos Programas de Reassentamento IPR-750/2022, que trata dos Critérios de Inclusão nos Programas de Remoção e Reassentamento da autarquia. Para serem atendidos pelo programa, por qualquer modalidade de remoção, os núcleos familiares devem atender simultânea e cumulativamente aos seguintes requisitos:

- Apresentar situação socioeconomicamente vulnerável, conforme a Pesquisa Básica de Vulnerabilidade Social - PBVS;
- Possuir ocupação direta da faixa de domínio no trecho dos Lotes 8A e 8B. A ocupação deve ser para fins de moradia ou misto (moradia e atividade econômica). Uma ocupação mista é considerada para fins de moradia.
- A ocupação deve ter sido iniciada até a data estipulada como a Data Corte.

Núcleos familiares com ocupação exclusivamente para fins diversos ao de moradia (atividade econômica) também podem ser atendidos, mas obrigatória e exclusivamente pela modalidade de compensação monetária, e desde que a ocupação seja caracterizada como de autossustento e dependência financeira para a família. Famílias que ocupam a moradia a título de locação, usufruto, empréstimo ou cessão gratuita não poderão optar pela compensação monetária, somente reassentamento individual ou coletivo, se atenderem aos requisitos.

O DNIT está realizando o recadastramento das famílias ocupantes da faixa de domínio na BR-381/MG no trecho dos lotes 08A e 08B. O objetivo é identificar alterações nesses cadastros anteriores, "selar" as ocupações e obter dados atualizados sobre o núcleo familiar, perfil socioeconômico, data da ocupação, objetivo (moradia, atividade econômica, misto), características da atividade econômica (autossustento), título da ocupação (ex: locação), propriedade

de outro imóvel, benefícios habitacionais prévios e características das benfeitorias.

Conhecer a realidade das famílias é passo fundamental para o planejamento do reassentamento, focando nas especificidades de cada grupo familiar. A remoção involuntária não pode significar sofrimento para essas famílias. O objetivo é realizar o reassentamento humanizado, garantindo direitos com máxima transparência. Para tanto, é necessária a participação da comunidade, o envolvimento dos beneficiários com o projeto.

Durante o recadastramento, as famílias são informadas sobre os termos do programa e as modalidades de remoção. Inicialmente, o recadastramento será baseado no projeto de traçado existente, mas deverá ser atualizado se o traçado for alterado pelos vencedores da licitação, para identificar as famílias efetivamente impactadas. O cadastramento não representa a obrigatoriedade de o DNIT reassentar a família, caso não haja risco ou interesse das obras.

A avaliação de risco das moradias ganha uma relevância ainda maior no contexto das mudanças climáticas. Considerando a drenagem da rodovia e a estabilidade dos seus taludes de corte e aterro, torna-se necessário avaliar quais moradias poderão ser impactadas em eventos extremos, como chuvas acima da média. Assim, além de viabilizar as obras de duplicação, o reassentamento conduzido pelo DNIT também pode prevenir desastres relacionados às mudanças climáticas.

Em que pese a competência municipal nos assuntos da Defesa Civil, a redução de riscos de desastres deve ser priorizada em todas as esferas de governo, incluindo a alocação de orçamentos específicos para a prevenção de desastres e a promoção da participação comunitária. A abordagem de resiliência urbana requer uma combinação de medidas estruturais e não estruturais que fortalecem a infraestrutura urbana e promovem a adaptação às mudanças climáticas (GODOY; BENINI, 2024).

Os dados do recadastramento serão apresentados ao juízo pelo DNIT, incluindo uma listagem completa e indicação individual para cada núcleo familiar sobre o objetivo da ocupação; atendimento ou não dos requisitos de elegibilidade/exclusão; e a tipologia de moradia aplicável (para ocupações de moradia/mistas). Para o

planejamento da construção das unidades habitacionais, é imprescindível obter a informação das tipologias necessárias. A tipologia da moradia aplicável para reassentamento (individual ou coletivo) é definida com base no número de pessoas no núcleo familiar, gênero e situação de cada indivíduo, determinando o número de quartos necessários (Tabela 01).

**Tabela 1:** Tipologias de moradias

| QUANTIDADE DE PESSOAS NA FAMÍLIA | COMPOSIÇÃO FAMILIAR | TIPOLOGIA DO IMÓVEL |
|---|---|---|
| **1 (uma)** | Indiferente | 1 (um) quarto |
| **2 (duas)** | Casal sem filhos e/ou pessoas do mesmo sexo | 2 (dois) quartos |
| **3 (três)** | Indiferente | |
| **4 (quatro)** | 2 (duas) pessoas de sexo masculino e 2 (duas) pessoas do sexo feminino, sem presença de casal | |
| | 3 (três) pessoas de mesmo sexo masculino e 1 (uma) de sexo diferente, sem presença de casal | |
| | 2 (dois) casais sem filhos (ex.: genro + nora e/ou cunhados) | |
| | 1 (um) casal e 2 (duas) pessoas de mesmo sexo | |
| | 1 (um) casal e mais 2 (duas) pessoas de sexos diferentes (crianças ou não) | 3 (três) quartos |
| **5 (cinco)** | 1 (um) casal e mais 3 (três) pessoas do mesmo sexo | 2 (dois) quartos |
| | 3 (três) pessoas de mesmo sexo e 2 (duas) pessoas de outro, sem formação de casal | |
| | 5 (cinco) pessoas de mesmo sexo, sem presença de casal | |
| | 1 (um) casal, 2 (duas) pessoas de mesmo sexo e 1 (uma) de sexo diferente | 3 (três) quartos |
| | 2 (dois) casais (ex.: casal + genro e nora) mais 1 (uma) de qualquer sexo | |
| | 4 (quatro) pessoas do mesmo sexo e 1 (uma) de sexo diferente | |
| **6 (seis)** | Indiferente | |

Nos casos de compra assistida, as características exigidas para o imóvel a ser adquirido incluem: não estar em risco/insalubridade, possuir laudo de habitabilidade, situação jurídica regular que permita transferência de domínio, dispor de equipamentos

públicos/privados essenciais na região, e ajustar-se aos limites de valor. Será formado um Banco de Imóveis pelo DNIT, que irá incluir imóveis no colar metropolitano de Belo Horizonte. Os valores máximos (teto) para a aquisição individual assistida são definidos por estudo técnico do DNIT, sendo atualizados anualmente pelo Índice de Preços ao Consumidor Amplo Especial – IPCA-E.

As famílias elegíveis para reassentamento de moradia/misto podem optar por compensação monetária. O valor da compensação é calculado com base no valor das benfeitorias úteis do laudo de avaliação do Cadastro Técnico de Ocupação, seguindo a metodologia de Custos de Reprodução. O valor corresponde ao valor de reprodução das benfeitorias sem depreciação. O pagamento integral ocorre somente após a saída da família da faixa de domínio. O acordo em discussão estipula que apenas um benefício de compensação monetária será pago por núcleo familiar, mesmo que ele possua múltiplas benfeitorias residenciais ou mistas na área.

Importante ressaltar que a opção pela compensação monetária será restrita, já que existe a preocupação de que as famílias possam mudar para uma outra área de risco, inclusive Áreas de Preservação Permanente – APPs, como margens de rios e córregos, bem como encostas. Assim, o reassentamento humanizado não teria resultado em relação à proteção dessas famílias frente aos riscos climáticos. A restrição à modalidade da compensação monetária leva em conta o objetivo de reduzir as ocupações de áreas de risco.

Em casos de urgência para liberação de frentes de obra ou de riscos geológicos, é admitido o abrigamento provisório com "aluguel social" ou instrumento similar municipal. A operacionalização material cabe ao município de localização da ocupação. O ônus financeiro (aluguel social e auxílio mudança) é do DNIT. O programa Concilia BR-381 e Anel Rodoviário foi a primeira experiência do DNIT na execução e no acompanhamento do aluguel social. Entre os anos de 2013 e 2021, 168 famílias foram beneficiadas por esse dispositivo (MARTINS et al., 2023). No âmbito do DNIT, o aluguel social foi entendido como uma solução temporária e de caráter excepcional; uma ferramenta a ser utilizada em casos específicos para evitar atrasos nas obras ou acidentes decorrentes do risco geológico das moradias.

No contexto das mudanças climáticas, o instrumento do aluguel social tem sido largamente utilizado pelas prefeituras. É a forma mais célere de retirar as famílias das áreas de risco, especialmente em casos de deslizamento de encostas. Tal instrumento também será utilizado pelo DNIT nos casos de famílias ocupantes da faixa de domínio da BR-381 que sejam impactadas por chuvas extremas.

Durante o reassentamento da segunda etapa, o DNIT realizará acompanhamento pré e pós morar para as famílias beneficiadas. O acompanhamento pré-morar inclui comunicação, esclarecimentos sobre critérios, direitos, deveres e o plano de reassentamento, orientação na escolha do imóvel e preparação para o novo local. Conforme exposto, o reassentamento é conduzido de forma humanizada e participativa. A humanização da remoção caracteriza-se pelo reassentamento em local próximo ao ocupado, fora da área de risco da rodovia, em moradia habitável e localizada em região com equipamentos públicos e serviços essenciais (água, esgoto, saúde, educação, acesso, transporte).

## O REASSENTAMENTO DA VILA BOM DESTINO EM SANTA LUZIA /MG

**Figura 1:** Moradia em área alagada na Vila Bom Destino.
*Fonte: Arquivo interno do DNIT.*

O DNIT cadastrou 411 moradias na Vila Bom Destino nos meses de maio e junho de 2025, aplicando as Pesquisas Básicas de Vulnerabilidade Social – PBVS com as famílias. A Vila Bom Destino caracteriza-se por ocupações em sua maior parte precárias e muito próximas a rodovia. Outra característica da Vila Bom Destino é a topografia desfavorável para a construção de moradias, bem como problemas estruturais do bairro, que ficam ainda mais evidentes no período das chuvas, sendo comum alagamentos das vias e das moradias.

As construções da Vila Bom Destino estão concentradas na faixa de domínio da BR-381/MG. Essa faixa de 40 metros para cada lado do eixo compreende a faixa de segurança da rodovia para casos de acidentes, e também preserva os equipamentos da rodovia, como o sistema de drenagem, sinalização, etc. No trecho da Vila Bom Destino, a faixa de domínio da BR-381/MG está totalmente ocupada nos dois sentidos da rodovia, o que gera um comprometimento da operação da rodovia, gerando instabilidades nos taludes, aterros e até mesmo na plataforma.

**Figura 2:** Foto das moradias próximas ao bordo da rodovia BR-381/MG.
*Fonte: Arquivo interno do DNIT.*

A Vila Bom Destino possui um histórico de moradias condenadas pela Defesa Civil da Prefeitura de Santa Luzia, em função de abalos estruturais nas construções por conta das características do

terreno e da proximidade com a rodovia BR-381/MG. Em função dos Acordos de 2014 e 2017, o DNIT realizou o reassentamento de 25 famílias da Vila Bom Destino, a maioria em função dos riscos geológicos na área de construção das moradias.

Além do risco de escorregamento do talude da rodovia, especialmente no período chuvoso, é importante destacar o risco estrutural inerente às construções feitas sem responsável técnico, aliado também à proximidade com a rodovia BR-381/MG, que representa uma fonte de vibrações e trepidações que podem abalar as construções. Segundo os laudos da Defesa Civil da Prefeitura de Santa Luzia, a maioria das construções da Vila Bom Destino não possui rigor construtivo, e os materiais de construção empregados na benfeitoria são de má qualidade, o que aumenta os riscos estruturais.

A defesa civil da prefeitura de Santa Luzia realizou vistorias em várias moradias da Vila Bom Destino em janeiro de 2018, e condenou várias construções por apresentarem riscos iminentes de colapso. Segundo Laudo da Defesa Civil da Prefeitura de Santa Luzia de 08/01/2018:

> "*Dadas as características físicas do terreno, associadas as intervenções antrópicas sem acompanhamento do devido técnico profissional, tendo como agente potencializador as chuvas constantes neste período, não está descartada a possibilidade de escorregamento da encosta e/ou talude, ou seja, existe a risco de sinistro/desastre ou o agravamento do quadro fático, caso já tenha ocorrido.*"

**FOTO 01**: Rachaduras no interior da casa da solicitante Sra. Rosangela Aparecida Cardoso de Freitas.

**FOTO 02**: Talude Íngreme (inclinado) havendo risco de deslizamento.

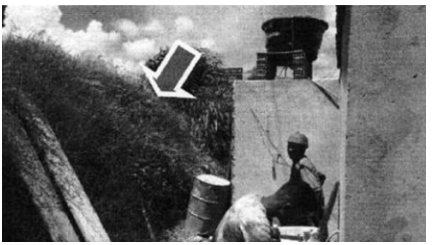


**Figura 3:** Relatório fotográfico do Laudo da Defesa Civil de Santa Luzia/MG.
*Fonte: Arquivo interno do DNIT.*

O município de Santa Luiza registrou fortes chuvas no final do ano de 2017 e início do ano de 2018, com vários alagamentos pela cidade. Chuvas acima da média histórica estão cada vez mais frequentes, em função das mudanças climáticas, o que implica na necessidade de adoção de medidas para adaptar as rodovias a essas condições. O produto 05 do Projeto AdaptaVias apresenta a seguinte constatação sobre erosões para o caso de ferrovias, que se aplica, da mesma forma, para rodovias:

> "*Já na erosão, os impactos tendem a ser agravados por sensibilidades na superfície vegetal degradada e em áreas com erosão não tratada. Além disso, destaca-se que a falta de capacidades adaptativas como práticas de proteção de talude inexistentes ou ineficazes, frequência de manutenção das ferrovias reduzida e falta de controle do uso e ocupação do solo são fatores agravantes para intensificação dos impactos*" (MT, 2021).

Algumas famílias da Vila Bom Destino, na área da faixa de domínio da BR-381/MG, que tiveram as suas moradias condenadas pela Defesa Civil de Santa Luzia foram direcionadas para o aluguel social da Prefeitura Municipal de Santa Luzia. Contudo, a maioria dessas famílias foi atendida de forma prioritária pelo Programa Judicial Concilia BR-381 e Anel Rodoviário, por meio da compra assistida. A maioria das construções foram demolidas após a desocupação, para evitar a reocupação e que outra família ficasse em risco. Contudo, infelizmente, algumas construções não puderam ser demolidas e acabaram reocupadas.

Com o passar dos anos, mais moradias na Vila Bom Destino apresentaram riscos estruturais, o que gerou atenção por parte do DNIT. Com a decisão do Ministério dos Transportes de delegar ao DNIT as obras de duplicação dos Lotes 08A e 08B, o reassentamento de todas as famílias na faixa de domínio da BR-381/MG, na Vila Bom Destino, pode ser finalmente planejado. Para fazer frente aos mais de 400 cadastros sociais feitos pela equipe social, o DNIT tem buscado parceria com as Prefeituras para a construção de um empreendimento do Minha Casa Minha Vida na região, em atendimento às expectativas do Acordo Judicial.

A comunicação com a comunidade é essencial para o bom andamento dos trabalhos. É natural que haja uma ansiedade das famílias em sair das áreas de risco e também um certo receio sobre a atuação do poder público. Muitas famílias foram cadastradas há 10 anos e não foram reassentadas, isso gera desconfiança em relação ao trabalho do DNIT.

## CONSIDERAÇÕES FINAIS:

O reassentamento das famílias na faixa de domínio da BR-381/MG representa mais que a liberação de frentes de obras, é uma ação para a segurança das famílias e para os usuários da rodovia. Para viabilizar o reassentamento de quase 2 mil famílias, é necessário revisar o acordo judicial do Programa Concilia BR-381/MG Norte e Anel Rodoviário. O novo acordo judicial em discussão representa um esforço para criar um arcabouço jurídico e operacional robusto para lidar com o complexo desafio do reassentamento desse grande número de famílias vulneráveis, impactadas por uma obra de infraestrutura de grande porte.

O novo acordo incorpora lições aprendidas em fases anteriores, buscando otimizar processos e garantir a eficiência e eficácia do programa. A ênfase nas diretrizes de humanização e participação, aliada à definição clara de critérios de elegibilidade e exclusão, bem como à diversificação das modalidades de atendimento (coletivo, individual, compensação, abrigamento provisório), reflete a tentativa de equilibrar as necessidades da obra com a proteção dos direitos fundamentais dos ocupantes. A estruturação do recadastramento, a definição de tipologias baseadas no perfil familiar e a previsão de acompanhamento pré e pós-morar são elementos cruciais para a organização e o sucesso do programa. A clareza sobre os valores máximos de aquisição individual e os mecanismos financeiros busca trazer previsibilidade e transparência, buscando a solução consensual e judicialmente homologada para garantir os direitos das populações afetadas.

O reassentamento da Vila Bom Destino é um dos pontos crucias para as obras de duplicação do lote 08B da BR-381/MG, sendo também uma iniciativa importante para tirar um grande número de

famílias das áreas de risco. A remoção dessas famílias apresenta-se de forma ainda mais relevante com o agravamento da questão climática, com as mudanças significativas no regime das chuvas, o que apresenta um risco ainda maior para essas famílias.

A rodovia BR-381/MG é considerada uma infraestrutura crítica, por ser uma via de transporte essencial para o Estado de Minas Gerais. Portanto, além da segurança das famílias ocupantes da faixa de domínio, faz-se necessário zelar pela operação da rodovia. É crucial considerar o papel da conservação ambiental e dos eventos extremos no contexto do planejamento estratégico e da segurança das infraestruturas críticas no Brasil. Em particular, no caso brasileiro, onde a maior da parte da população e das infraestruturas estão concentradas em áreas urbanas, faz-se necessário avaliar o nexo entre eventos extremos, resiliência e vulnerabilidade humana (BUSTAMANTE, 2022).

## REFERÊNCIAS


BUSTAMANTE, Mercedes. **Soluções baseadas na natureza e a redução da vulnerabilidade de infraestruturas críticas frente às mudanças do clima**. Diálogos Soberania e Clima, Brasília, DF, v. 1, n. 3, p. 4–10, 2022. Centro Soberania e Clima. ISSN 2764-9717. Disponível em: https://www.soberaniaeclima.org.br. Acesso em: 20 out. 2025

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. Publicação IPR – 750: **Diretrizes dos Programas de Reassentamento**. 1. ed. Brasília, DF, 2022. 232p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Arquivo interno do DNIT**. Brasília. 2024. Disponível no processo administrativo SEI DNIT 00417.283440/2024-86. Acesso em maio de 2025.

FERREIRA, R. M. P.; FARIA, S. D. & FONSECA. B. M. **A Geografia dos acidentes na BR-381 entre Belo Horizonte e Governador Valadares, o que pode ser explicado pela morfoestrutura regional?** Geografias: Artigos Científicos. Belo Horizonte 08(1) 84-97 janeiro-junho de 2012.

GODOY, Jeane Aparecida Rombi de; BENINI, Sandra Medina. **Resiliência urbana: políticas para enfrentar desastres naturais e mudanças climáticas**. Revista PPC – Políticas Públicas e Cidades, Curitiba, v. 13, n. 1, p. 1–18, 2024. DOI: https://doi.org/10.23900/2359-1552v13n1-34-2024

MARTINS, Laura Maria Alves Vaz; FRAGOSO, Michele Mitie Arake; FERREIRA, Tiago Cardoso; SOARES, Glícia Oliveira; TORRES, Diarlon Cesar. **Aluguel social no âmbito do programa Concilia BR-381 e Anel – principais aprendizados e sugestões para programas futuros**. Revista ENINFRA, Brasília, DF, v. 1, n. 2, p. 209-221, set. 2023. Disponível em: https://revistaeninfra.dnit.gov.br/. Acesso em: 20 out. 2025.

MINISTÉRIO DOS TRANSPORTES. Projeto Adaptavias. Brasília. 2021. Disponível em: https://www.gov.br/transportes/pt-br/assuntos/sustentabilidade/produto5.pdf

MOTTA, Dayse Starling. **Remoções forçadas decorrentes de projetos de desenvolvimento e o direito à moradia digna**. 2016. 123 f. Dissertação (Mestrado em Direito Público) – Faculdade de Direito, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2016.

4

# *RESETTLEMENT IN AREAS OF RISK AND CLIMATE CHANGE:* THE CASE OF VILA BOM DESTINO (BR-381/MG)

LEANDRO EUSTÁQUIO TITO MUNIZ

## ABSTRACT

This chapter discusses the challenges and strategies of resettlement in risk areas associated with transport infrastructure works, highlighting the case of Vila Bom Destino, on BR-381/MG, and the impacts of climate change on these vulnerable populations. It presents the DNIT guidelines, the types of assistance provided, and the lessons learned from previous legal agreements, emphasizing the importance of climate adaptation and social resilience in the context of public works. The resettlement addressed in this chapter will be carried out under the scope of the Judicial Agreement to be signed between the National Department of Transport Infrastructure, the Municipality of Belo Horizonte, the Federal Public Prosecutor's Office, and the Federal Public Defender's Office, under Public Civil Action No. 0057367.09.2013.4.01.3800. The agreement aims to establish procedures for the resettlement and monetary compensation of socioeconomically vulnerable occupants of the right-of-way of Lots 8A and 8B of BR-381/MG/Norte, stretch between Caeté and Belo Horizonte/MG.

**Keywords**

Resettlement, risk areas and transport infrastructure

## INTRODUCTION

The BR-381/MG Norte highway, a stretch between Governador Valadares and Belo Horizonte, is considered one of the most dangerous highways for users in Brazil, often called the highway of death. The highway is 303 km long, most of it in a single lane, and located in mountainous terrain. The duplication of this road stretch is an old and constant demand of the population of Minas Gerais, especially due to the high number of accidents, often fatal (FERREIRA, FARIA and FONSECA, 2012).

The National Department of Transport Infrastructure (Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes - DNIT) began projects to duplicate the BR-381/MG Norte in 2007 and, after obtaining the Preliminary License in 2010, began the bidding process for the works through integrated contracting in 2013 and 2014. The DNIT obtained the Installation License in March 2014, having as one of the environmental programs the Expropriation and Resettlement Program, which aims to remove families in a humane manner.

Although DNIT tendered the works in lots 01 to 07, for various reasons, the works did not progress as expected. Only the works in lots 3.1, 3.2, 3.3 and 07 were practically completed. Lots 08A and 08B did not have the works contracted, largely due to the market's lack of interest in this project due to the need to remove many families. In 2021 and 2022, the Ministry of Infrastructure attempted to grant the BR-381 highway to the private sector, but was unsuccessful. The Ministry of Transport repeated the attempt in 2023 and, once again, was unsuccessful.

In early 2024, the Ministry of Transport decided to amend the concession project for the BR-381/MG Norte section, excluding the obligation to carry out works on lots 08A and 08B from the future concessionaire. With this decision, DNIT became responsible for the duplication works of lots 08A and 08B, which correspond to the stretch between Caeté and Belo Horizonte, with a total length of 31 km. According to the concession contract, the works must be delivered by DNIT by the eighth year of the concession.

This stretch is considered the most complex for the start of construction, due to the intense irregular occupation of the righ-

t-of-way of the BR-381/MG highway, especially by socioeconomically vulnerable families, which implies a process of resettlement of these occupants. The BR-381/MG right-of-way is delimited by the 40-meter strip of land on each side of the highway axis, that is, in relation to the lane dividing strip. In the municipality of Belo Horizonte, the right-of-way is 25 meters.

It is important to highlight that on October 28, 2013, the Federal Public Prosecutor's Office (Ministério Público Federal – MPF) and the Federal Public Defender's Office (Defensoria Pública da União – DPU), in a joint action, filed Public Civil Action (Ação Civil Pública – ACP) No. 5736709.2013.4.01.3800. This ACP aims to ensure that the low-income population, living in areas close to the BR-381/MG-Norte highway, which will be affected by the works, have their rights respected in the removal process.

In November 2014, the MPF, the DPU, the Federal Government, Caixa Econômica Federal, and DNIT signed the first Judicial Agreement for the resettlement of socioeconomically vulnerable families from the BR-381 North right-of-way. In 2017, MPF, DPU, Urbel, and DNIT signed the Term of Agreement No. 01/2017, for the resettlement of the Villa da Paz, Pica Pau, Luz and Bom Destino, with the resettlement divided into two stages, with the first stage consisting of the Vila da Paz and Pica Pau and the second stage of the Vila da Luz and Bom Destino.

The resettlement of Vila Bom Destino has always been a demand made by the municipality of Santa Luzia to the DNIT, due to the geological risks for the houses built on the cutting slope of the BR-381/MG highway. The occupation of the slopes of the BR-381/MG highway by irregular constructions is a risk for residents and for the stability of the highway, especially in the rainy season. In a scenario in which the rainy season has been registering above-average rainfall due to climate change, the risk becomes even greater. Relocating the families that currently occupy the risk areas is a measure to adapt the BR-381/MG highway, with a focus on the safety of residents and highway users.

Thus, this chapter presents the measures adopted by the DNIT so far to enable the resettlement of families occupying the BR-381/MG right-of-way. This resettlement is necessary to allow

for the duplication of the highway and to change the lives of families who live today in risk areas, in an increasingly critical situation due to climate change. This chapter is structured in two sub-items, which present the Judicial Agreement under development to define the rules for resettlement and the actions already taken in the specific case of Vila Bom Destino, in the municipality of Santa Luzia/MG.

## *THE CONSTRUCTION OF THE NEW JUDICIAL RESETTLEMENT AGREEMENT FOR LOTS 08A AND 08B OF BR-381/MG*

In 2025, DNIT completed the first stage of the resettlement that included the Vila da Paz and Pica Pau, in addition to other priority resettlements determined by the federal court. At the start of the second stage, it became necessary to revise the Term of Agreement No. 01/2017, given the need to include other occupations, as well as changes made to the original agreement, such as the Term of Agreement No. 01/2020, which had removed Vila Bom Destino from the DNIT's obligations. However, as lots 08A and 08B were excluded from the concession, the resettlement of Vila Bom Destino returned to the DNIT.

Thus, it is necessary to enter into a new Judicial Agreement between the parties. The central objective is the resettlement and monetary compensation of vulnerable occupants in the right-of--way of BR-381/MG/Norte and the Belo Horizonte Ring Road, specifically in the stretch between Caeté and Belo Horizonte. The agreement represents phase 2 of the Judicial Program Concilia BR-381 and Anel Rodoviário.

At this point, it is important to contextualize the creation of the Judicial Program Concilia BR-381 and Anel Rodoviário. As reported, the MPF and DPU filed a Public Civil Action, which was heard by the 7th Federal Court of the Judicial Section of Minas Gerais. The presiding judge responsible for the creation of the Concilia Program, Dr. Dayse Starling Motta, described the beginning of the case in her dissertation as follows:

> "*In the face of the housing deficit and the slowness of the municipal public authorities in developing and executing housing programs, in contrast to the strong social pressure and mobilization, demonstrated through the numerous invasions of public and private land, and with the certainty that this is not a police problem, a humane removal and resettlement program is developed.*
>
> *Thus, the Judiciary had taken over the process, developing a system to resolve the dispute involving the existing occupations on the margins of the Belo Horizonte Ring Road and BR381/Norte, with the creation of a Judicial Conciliation Program for the humane removal and resettlement of socioeconomically vulnerable families, guided by the guarantee and effectiveness of human rights*" (MOTTA, 2016, *p* 13).

It is important to emphasize that Belo Horizonte has a considerable housing deficit, which leads to constant occupations of public and private properties, ultimately resulting in forced removals. As Motta (2016, p.13) points out:

> "*It is necessary to address the problem in its genesis: disregard for the right to the city and the essential fulfillment of its social functions, and, consequently, the absence of public policies for the generation of employment and income and housing, consistent and in the necessary volumes, in order to ensure the realization of fundamental human rights.*

The families occupying the right-of-way of BR-381/MG Norte are not there by choice, but because these families have been denied their right to the city. Irregular occupations are a reflection of the absence of public policies aimed at the most vulnerable. Thus, in forced removals for infrastructure works, it is necessary to consider the social functions of the city and the impacts on the city of the project. It is up to the DNIT to understand the dynamics of the families to be resettled, estimated at almost 2 thousand family groups.

The challenge of re-registering, removing and resettling this number of families within the construction schedule is significant for DNIT. A common understanding for the second stage

of resettlement is that the methodology for acquiring housing should preferably be collective, through the Minha Casa Minha Vida Program. Individual acquisition (assisted purchase) would be the exception, due to the estimated volume of resettlements. However, the implementation of the collective model requires more time and planning, making it likely that, at the beginning of the works, it will be necessary to act in the individual model and even provide temporary shelter. Another possibility is monetary compensation for families who so desire.

It should be noted that the three modalities were defined based on DNIT guidelines, according to internal regulations, and debated in court, with the participation of the MPF and DPU, in addition to the families. The involvement of the affected families was promoted through community meetings and social monitoring, carried out in partnership with the municipalities. The three resettlement modalities intended in the second stage can be described as follows:

- Collective Resettlement: Construction of housing units. This modality is preferential for families located in occupation clusters (villages, neighborhoods). It will be carried out in partnership with the municipalities and the Federal Government (Ministry of Cities), with contributions from DNIT. Municipalities are responsible for allocating land, constructing units, and providing public facilities;
- Individual Resettlement: Assisted purchase of properties available on the local market. This modality is preferable for isolated occupations, due to the individualized service. For Lot 8A, this will be the initial modality, given the dispersion of occupations, the estimated time for the collective model, the schedule of the works and the availability of resources;
- Monetary (Financial) Compensation: Payment of a cash amount. Applicable when the family expresses interest, following specific formalities.

If it is not possible to immediately apply one of the main modalities, temporary shelter may be provided with the payment of “social rent” to the families, through the existing systems in the

municipalities. This is a measure that aims to assist families in areas of greater geological risk and in priority areas for construction work. Social rent is an important tool for assisting families in situations of greater vulnerability to climate change, especially those living in areas of greater risk.

It is important to note that DNIT has resettlement regulations, especially Normative Instruction No. 56/2021 and the document Guidelines for Resettlement Programs IPR-750/2022, which deals with the Inclusion Criteria in the Removal and Resettlement Programs of the municipality. To be eligible for the program, for any type of removal, the family nuclei must simultaneously and cumulatively meet the following requirements:

- To present a socioeconomically vulnerable situation, according to the Basic Survey of Social Vulnerability (Pesquisa Básica de Vulnerabilidade Social - PBVS);
- To have direct occupation of the right-of-way in the stretch of Lots 8A and 8B. the occupation must be for housing purposes or mixed (housing and economic activity). A mixed occupation is considered for housing purposes.
- The occupation must have started by the date stipulated as the Cut-off Date.

Families with occupation exclusively for purposes other than housing (economic activity) may also be assisted, but only through monetary compensation and provided that it is characterized as self-support and financial dependence for the family. Families who occupy the house on a rental, usufruct, loan or free assignment will not be able to opt for monetary compensation; only individual or collective resettlement, if they meet the requirements.

The DNIT is re-registering families occupying the right-of--way on BR-381/MG in the stretch of lots 08A and 08B. The objective is to identify changes in these previous registrations, "seal" the occupations and obtain updated data on the family unit, socioeconomic profile, date of occupation, purpose (housing, economic activity, mixed), characteristics of the economic activity (self-suste-

nance), title of occupation (e.g., lease), ownership of other property, previous housing benefits, and characteristics of the improvements.

Understanding the reality of these families is a fundamental step in planning resettlement, focusing on the specificities of each family group. Involuntary removal cannot mean suffering for these families. The objective is to carry out humane resettlement, guaranteeing rights with maximum transparency. To this end, the participation of the community and the involvement of the beneficiaries with the project are necessary.

During re-registration, families are informed about the terms of the program and the modalities of removal. Initially, re-registration will be based on the existing route project, but it must be updated if the route is changed by the winning bidders, in order to identify the families that are actually affected. The registration does not represent the obligation of the DNIT to resettle the family, if there is no risk or interest in the works.

The risk assessment of housing becomes even more relevance in the context of climate change. Considering the drainage of the highway and the stability of its cut and fill slopes, it is necessary to assess which houses may be impacted by extreme events, such as above-average rainfall. Thus, in addition to making the duplication works viable, the resettlement conducted by DNIT can also prevent disasters related to climate change.

Despite municipal jurisdiction over Civil Defense matters, disaster risk reduction should be prioritized at all levels of government, including the allocation of specific budgets for disaster prevention and the promotion of community participation. The urban resilience approach requires a combination of structural and non-structural measures that strengthen urban infrastructure and promote climate change adaptation (GODOY; BENINI, 2024).

The re-registration data will be submitted to the court by DNIT, including a complete list and individual indication for each family unit on the purpose of the occupation; whether or not the eligibility/exclusion requirements are met; and the applicable housing type (for housing/mixed occupations). For the planning of the construction of housing units, it is essential to obtain information

on the necessary types. The type of housing applicable for resettlement (individual or collective) is defined based on the number of people in the household, gender and situation of each individual, determining the number of rooms needed (Table 01).

**Table 1:** Housing typologies

| NUMBER OF PEOPLE IN THE FAMILY | FAMILY COMPOSITION | TYPOLOGY OF THE PROPERTY |
|---|---|---|
| **1 (one)** | Indifferent | 1 (one) bedroom |
| **2 (two)** | Childless and/or same-sex couple | 2 (two) bedrooms |
| **3 (three)** | Indifferent | |
| **4 (four)** | 2 (two) males and 2 (two) females, without the presence of a couple | |
| | 3 (three) people of the same sex male and 1 (one) of different sex, without the presence of a couple | |
| | 2 (two) houses without children (e.g., son-in-law + daughter-in-law and/or brothers-in-law) | |
| | 1 (one) couple and 2 (two) people of the same sex | |
| | 1 (one) couple and 2 (two) people of different sexes (children or not) | 3 (three) bedrooms |
| **5 (five)** | 1 (one) couple and 3 (three) people of the same sex | 2 (two) bedrooms |
| | 3 (three) people of the same sex and 2 (two) people of the other, without forming a couple | |
| | 5 (five) people of the same sex, without the presence of a couple | |
| | 1 (one) couple, 2 (two) people of the same sex and 1 (one) of different sex | 3 (three) bedrooms |
| | 2 (two) couples (e.g., couple + son-in-law and daughter-in-law) plus 1 (one) of any sex | |
| | 4 (four) people of the same sex and 1 (one) of different sex | |
| **6 (six)** | Indifferent | |

In cases of assisted purchase, the characteristics required for the property to be acquired include: not being at risk/unsafe, having a habitability report, a regular legal status that allows the transfer of ownership, having essential public/private equipment

in the region, and fitting within the value limits. A Real Estate Bank will be formed by DNIT, which will include real estate in the metropolitan collar of Belo Horizonte. The maximum values (ceiling) for assisted individual acquisition are defined by a technical study by DNIT, and are updated annually by the Special Extended Consumer Price Index (Índice de Preços ao Consumidor Amplo Especial – IPCA-E).

Families eligible for housing/mixed resettlement may opt for monetary compensation. The compensation amount is calculated based on the value of the useful improvements in the Technical Occupation Register appraisal report, following the Reproduction Costs methodology. The amount corresponds to the reproduction value of the improvements without depreciation. Full payment occurs only after the family leaves the right-of-way. The agreement under discussion stipulates that only one monetary compensation benefit will be paid per household, even if they have multiple residential or mixed improvements in the area.

It is important to note that the option for monetary compensation will be restricted, as there is concern that families may move to another risk area, including Permanent Preservation Areas (Áreas de Preservação Permanente – APPs), such as riverbanks and streams, as well as slopes. Thus, humane resettlement would not have been effective in protecting these families from climate risks. The restriction on monetary compensation modality takes into account the objective of reducing occupation of risk areas.

In urgent cases involving the clearing of construction sites or geological risks, temporary shelter with "social rent" or similar municipal instrument is permitted. The material operationalization is up to the municipality where the occupation is located. The financial burden (social rent and moving aid) is borne by the DNIT. The Concilia BR-381 and Anel Rodoviário program was DNIT's first experience in the execution and monitoring of social rent. Between 2013 and 2021, 168 families benefited from this program (MARTINS et al., 2023). Within the scope of the DNIT, social rent was understood as a temporary and exceptional solution; a tool to be used in specific cases to avoid delays in the works or accidents resulting from the geological risk of the houses.

In the context of climate change, the instrument of social rent has been widely used by local government. It is the fastest way to remove families from risk areas, especially in cases of landslides. This instrument will also be used by DNIT in the cases of families occupying the BR-381 right-of-way who are impacted by extreme rainfall.

During the resettlement of the second stage, DNIT will carry out pre- and post-living monitoring to beneficiary families. Pre-move support includes communication, clarification of criteria, rights, duties and the resettlement plan, guidance in choosing a property and preparation for the new location. As explained, resettlement is conducted in a humane and participatory manner. The humanization of the removal is characterized by resettlement in a place close to the occupied one, outside the risk area of the highway, in habitable housing and located in a region with public facilities and essential services (water, sewage, health, education, access, transportation).

## *THE RESETTLEMENT OF VILA BOM DESTINO IN SANTA LUZIA/MG*

**Figure 1:** House in a flooded area in Vila Bom Destino.
*Source: DNIT internal file.*

The DNIT registered 411 houses in Vila Bom Destino in May and June 2025, applying the Basic Social Vulnerability Surveys (Pesquisas Básicas de Vulnerabilidade Social – PBVS) with families. Vila Bom Destino is characterized by occupations that are mostly precarious and very close to the highway. Another characteristic of Vila Bom Destino is its unfavorable topography for housing construction, as well as structural problems in the neighborhood, which become even more evident during the rainy season, when flooding of roads and houses is common.

The constructions of Vila Bom Destino are concentrated in the right-of-way of BR-381/MG. This 40-meter strip on each side of the axis comprises the highway's safety zone for accidents and also preserves highway's equipment, such as the drainage system, signaling, etc. In the Vila Bom Destino section, the BR-381/MG right-of-way is fully occupied in both directions of the highway, which compromises the operation of the highway, causing instabilities on slopes, embankments and even on the platform.

**Fiigure 2:** Photo of the houses near the edge of the BR-381/MG highway.
*Source: DNIT internal file.*

Vila Bom Destino has a history of houses condemned by the Civil Defense of the Municipality of Santa Luzia, due to structural tremors in the constructions caused by the characteristics of the

terrain and the proximity to the BR-381/MG highway. As a result of the 2014 and 2017 Agreements, the DNIT resettled 25 families from Vila Bom Destino, most of them due to geological risks in the area where the houses were built.

In addition to the risk of slippage of the highway slope, especially in the rainy season, it is important to highlight the structural risk inherent in constructions made without a technical responsible, combined with the proximity to the BR-381/MG highway, which represents a source of vibrations and tremors that can shake the constructions. According to reports from the Civil Defense of the Municipality of Santa Luzia, most of the buildings in Vila Bom Destino do not meet construction standards, and the construction materials used in the improvement are of poor quality, which increases structural risks.

The civil defense department of the municipality of Santa Luzia conducted inspections in several houses in Vila Bom Destino in January 2018, and condemned several buildings for presenting imminent risks of collapse. According to the Civil Defense Report of the Municipality of Santa Luzia dated January 8, 2018:

> *"Given the physical characteristics of the terrain, combined with anthropogenic interventions without proper professional technician supervision, and with constant rainfall during this period as a contributing factor, the possibility of slope and/or landslide slippage cannot be ruled out. In other words, there is a risk of accidents/disasters or the worsening of the current, if it has already occurred."*

**PHOTO 01**: Cracks inside the house of the applicant, Mrs. Rosangela Aparecida Cardoso de Freitas.

**PHOTO 02**: Steep (inclined) slope with risk of landslide.

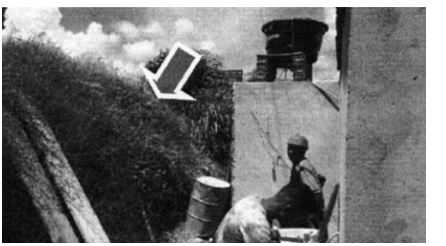


**Figure 3:** Photographic report of the Civil Defense Report of Santa Luzia/MG.
*Source: DNIT internal file.*

The municipality of Santa Luiza experienced heavy rainfall at the end of 2017 and beginning of 2018, with widespread flooding throughout the city. Rainfall above the historical average is becoming increasingly frequent due to climate change, which means that measures must be taken to adapt highways to these conditions. Product 05 of the AdaptaVias Project presents the following finding on erosion in the case of railways, which applies equally to highways:

> "*In erosion, the impacts tend to be aggravated by sensitivities on the degraded vegetation surface and in areas with untreated erosion. In addition, it is highlighted that the lack of adaptive capacities, such as non-existent or ineffective slope protection practices, reduced frequency of railroad maintenance, and lack of control over land use and occupation, are aggravating factors for the intensification of impacts*" (MT, 2021).

Some families from Vila Bom Destino, in the area of the BR-381/MG right-of-way, who had their homes condemned by the Civil Defense of Santa Luzia were directed to the social rent of the Municipality of Santa Luzia. However, most of these families were given priority by the Judicial Program Concilia BR-381 and Anel Rodoviário, through assisted purchase. Most of the buildings were demolished after eviction to avoid reoccupation and put another family at risk. However, unfortunately, some buildings could not be demolished and ended up being reoccupied.

Over the years, more houses in Vila Bom Destino have presented structural risks, which has attracted the attention of the DNIT. With the decision of the Ministry of Transport to delegate to DNIT the duplication works of Lots 08A and 08B, the resettlement of all families in the BR-381/MG right-of-way, in Vila Bom Destino, can finally be planned. To address the more than 400 social registrations made by the social team, DNIT has sought partnerships with the local governments to the construction of a Minha Casa Minha Vida (My House, My Life) project in the region, in accordance with the expectations of the Judicial Agreement.

Communication with the community is essential for the smooth progress of the work. It is natural for families to be anxious

to leave the risk areas and also to have some concerns about the actions of public authorities. Many families were registered 10 years ago and have not been resettled, which generates mistrust in the work of the DNIT.

## *FINAL CONSIDERATIONS:*

The resettlement of families in the BR-381/MG right-of--way represents more than the release of work fronts, it is an action to ensure the safety of families and highway users. To enable the resettlement of nearly 2,000 families, it is necessary to revise the legal agreement of the Concilia BR-381/MG Norte and Anel Rodoviário Program. The new legal agreement under discussion represents an effort to create a robust legal and operational framework to deal with the complex challenge of resettling this large number of vulnerable families impacted by a major infrastructure project.

The new agreement incorporates lessons learned in previous phases, seeking to optimize processes and ensure the efficiency and effectiveness of the program. The emphasis on the humanization and participation guidelines, combined with the clear definition of eligibility and exclusion criteria, as well as the diversification of the modalities of care (collective, individual, compensation, temporary shelter), reflects the attempt to balance the needs of the work with the protection of the fundamental rights of the occupants. The structuring of the re-registration process, the definition of typologies based on the family profile and the provision of pre- and post-housing follow-up are crucial elements for the organization and success of the program. Clarity regardind maximum individual acquisition values and financial mechanisms seeks to bring predictability and transparency, seeking a consensual and judicially approved solution to guarantee the rights of affected populations.

The resettlement of Vila Bom Destino is one of the crucial points for the duplication works of lot 08B of BR-381/MG, and is also an important initiative to remove a large number of families from risk areas. The removal of these families is even more relevant given the worsening climate situation, with significant changes in rainfall patterns, which poses an even greater risk for these families.

The BR-381/MG highway is considered critical infrastructure, as it is an essential transport route for the State of Minas Gerais. Therefore, in addition to the safety of the families living in the right-of-way, it is necessary to ensure the operation of the highway. It is crucial to consider the role of environmental conservation and extreme events in the context of strategic planning and the safety of critical infrastructures in Brazil. In particular, in the Brazilian case, where most of the population and infrastructures are concentrated in urban areas, it is necessary to assess the link between extreme events, resilience, and human vulnerability (BUSTAMANTE, 2022).

## REFERENCES


BUSTAMANTE, Mercedes. **Nature-based solutions and the reduction of the vulnerability of critical infrastructures to climate change**. Sovereignty and Climate Dialogues, Brasília, DF, v. 1, n. 3, p. 4–10, 2022. Sovereignty and Climate Center. ISSN 2764-9717. Available at: https://www.soberaniaeclima.org.br. Accessed on: 20 out. 2025

NATIONAL DEPARTMENT OF TRANSPORT INFRASTRUCTURE. IPR Publication – 750: **Guidelines for Resettlement Programs**. 1. ed. Brasília, DF, 2022. 232p.

NATIONAL DEPARTMENT OF TRANSPORT INFRASTRUCTURE. **DNIT internal file. Brasilia**. 2024. Available in the administrative proceeding SEI DNIT 00417.283440/2024-86. Accessed in May 2025.

FERREIRA, R. M. P.; FARIA, S. D. & FONSECA. B. M. The geography of accidents on the BR-381 between Belo **Horizonte and Governador Valadares, what can be explained by the regional morphostructure?** Geographies: Scientific Articles. Belo Horizonte 08(1) 84-97 January-June 2012.

GODOY, Jeane Aparecida Rombi de; BENINI, Sandra Medina. **Urban resilience: policies to address natural disasters and climate change**. PPC Journal – Public Policies and Cities, Curitiba, v. 13, n. 1, p. 1–18, 2024. DOI: https://doi.org/10.23900/2359-1552v13n1-34-2024

MARTINS, Laura Maria Alves Vaz; FRAGOSO, Michele Mitie Arake; FERREIRA, Tiago Cardoso; SOARES, Glícia Oliveira; TORRES, Diarlon Cesar. **Social rent within the scope of the Concilia BR-381 and Anel program – main lessons learned and suggestions for future programs**. ENINFRA Magazine, Brasília, DF, v. 1, n. 2, p. 209-221, set. 2023. Available at: https://revistaeninfra.dnit.gov.br/. Accessed on: 20 out. 2025.

MINISTRY OF TRANSPORT. **Adaptavias Project**. Brasilia. 2021. Available at: https://www.gov.br/transportes/pt-br/assuntos/sustentabilidade/produto5.pdf

MOTTA, Dayse Starling. **Forced evictions resulting from development projects and the right to decent housing**. 2016. 123 f. Dissertation (Master's Degree in Public Law) – Faculty of Law, Federal University of Minas Gerais, Belo Horizonte, 2016.

5

# AS SECAS NO BRASIL E IMPACTOS EM INFRAESTRUTURA

ANA PAULA M. A. CUNHA,
LIDIANE CRISTINA OLIVEIRA COSTA,
MÁRCIA REGINA GUIMARÃES GUEDES,
NELSON P. A. MATEUS
E SUELEN ROBALLO FISCHER.

## RESUMO

O risco de seca ou de eventos compostos de seca e calor (CSC) pode gerar impactos significativos nos meios de subsistência, nos setores produtivos, nos ecossistemas e nas infraestruturas. Nos últimos anos, grande parte do Brasil tem enfrentado secas mais frequentes e intensas, afetando também o sistema de transporte hidroviário. A redução dos níveis dos rios em razão do déficit hídrico prolongado compromete a navegabilidade, limita a capacidade operacional de portos e embarcações e eleva os custos logísticos. Este capítulo apresenta uma análise simplificada do risco potencial de eventos CSC, com foco nos sistemas de transporte rodoviário, ferroviário e hidroviário do país. Os resultados apontam para maior vulnerabilidade aos eventos CSC em trechos de rodovias das regiões Sudeste e Nordeste. No sistema hidroviário, a Hidrovia Solimões-Amazonas surge como a área mais crítica. A seca histórica de 2023-2024 na Amazônia evidenciou essa vulnerabilidade, destacando a necessidade de ações preventivas e de adaptação.

## Palavras-chave

Seca, extremos climáticos, sistemas de transporte

## INTRODUÇÃO

A seca é um extremo climático relacionado com a baixa disponibilidade hídrica originado pelo déficit de precipitação em comparação com condições normais e, muitas vezes, potencializado pelo aumento da demanda atmosférica de água após altas temperaturas ou ventos fortes (WMO, 2020; UNDRR, 2021). É importante ressaltar que os efeitos da seca se acumulam lentamente ao longo do tempo, podendo perdurar por meses ou anos após as chuvas retornarem aos seus valores médios.

Os eventos de secas podem resultar em desastres quando a demanda por água deixa de ser suprida, causando desequilíbrio hídrico para as diferentes atividades humanas (Wilhite e Glantz, 1987, UNDRR, 2021). Assim, a seca se configura como um risco quando há uma diminuição da capacidade dos diferentes sistemas em lidar com o déficit hídrico (Cunha et. al. 2018, 2019). Esse risco pode resultar em impactos nos meios de subsistência das pessoas, nos setores produtivos, na saúde dos ecossistemas, na vida de humanos e animais, no turismo, no transporte, dentre outros (Cunha et al., 2019; Marengo et al., 2021; Cuartas et al., 2022, WMO, 2021).

Entre 1970 e 2019, as secas causaram mais de 700.000 mortes — a maioria na África —, afetando desproporcionalmente mulheres e meninas (UNCCD, 2022). As perdas econômicas causadas pela seca multiplicaram-se nas últimas décadas (WMO, 2021). Estima-se que 55 milhões de pessoas em todo o mundo sejam diretamente afetadas pela seca todos os anos, tornando-a uma ameaça climática mais grave para os sistemas produtivos em todas as partes do mundo (WHO, 2021).

Desde a década de 90, as secas se tornaram mais frequentes e intensas no Brasil (valores mais negativos e consecutivos de SPEI, Figura 1). O Índice Padronizado de Precipitação e Evapotranspiração (SPEI) é um índice que leva em consideração tanto a precipitação quanto a evapotranspiração potencial, estimada com base na temperatura do ar, proporcionando uma medida integrada da disponibilidade hídrica e das condições climáticas de uma região, sendo uma forma simples de contabilizar os desvios do balanço hídrico de um determinado local (Vicente-Serrano et al., 2010).

Conforme os dados de SPEI, o Brasil enfrentou três grandes secas (picos negativos e consecutivos de SPEI, abaixo de -1,0): a primeira entre 1997 e 1998; a segunda, entre 2015 e 2016; e a última, em 2023 e 2024. Vale ressaltar que a seca de 2015-2016 superou a de 1997-1998, mas a última, de 2023-2024, apresentou valores de SPEI mais negativos, indicando ser a mais intensa da série histórica.

Dados do Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais (CEMADEN, 2024) mostram que, em 2024, mais da metade do Brasil sofreu os impactos diretos da seca. Os biomas Amazônia, Cerrado e Pantanal, especialmente, enfrentaram a pior seca dos últimos 70 anos. Até setembro de 2024, aproximadamente 1200 municípios no Brasil enfrentaram condições de seca severa e 263 municípios, seca extrema. O déficit de chuvas observado desde a primavera de 2023 em uma área tão extensa do Brasil (abrangendo as regiões do Norte ao Sudeste do país) e a ocorrência de altas temperaturas, ondas de calor e baixa umidade relativa do ar — que chegou a registrar valores próximos de 7% em parte da região Centro-Oeste —, impulsionou o alastramento das queimadas nessas regiões.

É importante destacar que esse cenário se deveu não apenas ao déficit de chuvas, mas à ocorrência simultânea de eventos de seca e extremos de calor, especialmente entre os anos de 2023 e 2024. A ocorrência de eventos compostos de seca-calor tem aumentado nos últimos anos e, de acordo com projeções de mudanças do clima, continuarão aumentando nas próximas décadas (Zscheischler et al. 2018, 2020; Vogel et al. 2020; IPCC 2021).

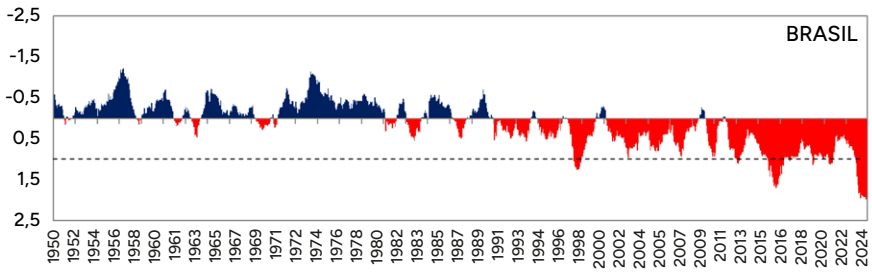



**Figura 1:** Evolução temporal das secas no Brasil considerando o Índice Padronizado de Precipitação e Evapotranspiração (SPEI) de 1951 a 2024.

As barras em azul indicam anos em que a precipitação foi maior do que a evapotranspiração (balanço hídrico positivo), indicando períodos mais úmidos, com maior disponibilidade de água, ao passo que as barras vermelhas indicam anos em que a evapotranspiração foi maior que a precipitação (balanço hídrico negativo), resultando em condições mais secas, com menor disponibilidade de água. *Fonte: elaboração própria a partir de dados de SPEI: Vicente-Serrano et al., 2010, pós-processamento e análises: CEMADEN/MCTI.*

Diferentemente de outros tipos de ameaças relacionadas ao clima, as secas costumam ser silenciosas e tardiamente percebidas, o que ocorre quando os impactos já se tornaram irreversíveis, especialmente aqueles de natureza indireta. Os impactos diretos ocorrem por meio de interações entre o déficit hídrico e os diferentes componentes ambientais, sociais ou econômicos, tais como insuficiência no abastecimento público, quebra de safras, redução da produção florestal, maior risco de propagação do fogo, impactos na navegação devido aos baixos níveis dos rios, impactos na produção industrial, dentre outros. Por outro lado, os impactos indiretos das secas são aqueles que não são resultado direto do déficit hídrico, e geralmente são produzidos à distância da região afetada pela seca, ou como resultado de uma via de impacto complexa. Uma vez que costumam ser silenciosos, os efeitos indiretos das secas podem se propagar rapidamente por todo o sistema econômico. Configuram-se como impactos indiretos aqueles relacionados com alguns serviços ecossistêmicos, biodiversidade, saúde, preços dos alimentos, infraestrutura, dentre outros (UNDRR, 2021, Niggli et al., 2022). Neste capítulo, os impactos das secas serão analisados sob a perspectiva das infraestruturas.

## RECORRÊNCIA DA SECA E A INFRAESTRUTURA

Nas últimas décadas, os sistemas de mobilidade urbana têm se mostrado cada vez mais vulneráveis aos impactos de eventos climáticos extremos, como secas prolongadas, ondas de calor intensas, alagamentos e tempestades severas. Esses fenômenos, ao atingirem centros urbanos, desencadeiam falhas operacionais, danos à infraestrutura viária e interrupções nos serviços de transporte, o que coloca em risco a segurança da população e compromete a

dinâmica socioeconômica das cidades. Esse cenário é agravado pela intensificação das mudanças climáticas, que têm amplificado tanto a frequência quanto a magnitude desses eventos, tornando ainda mais urgente o fortalecimento da resiliência e da capacidade adaptativa das redes de transporte urbano (SEITZ, 2025).

Condições de seca extrema têm efeitos profundos sobre os sistemas de transporte, especialmente naqueles que dependem de rios e hidrovias. A queda acentuada nos níveis dos cursos d'água durante períodos de estiagem compromete a navegabilidade e reduz a capacidade operacional de portos e embarcações, elevando significativamente os custos logísticos.

Além do comprometimento das hidrovias, os efeitos secundários da seca — como o aumento das temperaturas — agravam a vulnerabilidade das infraestruturas terrestres e aeroportuárias. O calor excessivo pode deformar pavimentos, amolecer o asfalto de pistas de pouso e levar ao empenamento de trilhos ferroviários, elevando o risco de acidentes e interrupções de serviços. Outro risco associado à seca é a subsidência do solo, provocada pela retirada intensiva de águas subterrâneas, podendo danificar estradas, redes de abastecimento e estruturas urbanas. O aumento do risco de incêndios florestais durante esses períodos também representa uma ameaça à visibilidade e à segurança de rodovias e aeroportos, exigindo a adoção de medidas emergenciais para garantir a continuidade do transporte em contextos de crise climática prolongada (UNITED STATES, 2023).

Njogu (2022) mostrou como as secas podem afetar a disponibilidade e qualidade de serviços de infraestrutura — incluindo energia, água, habitação e comunicações — no Quênia. Em período de seca, a infraestrutura fica exposta a maiores riscos de danos estruturais e deterioração, levando ao aumento dos custos de manutenção. Com isso, muitas vezes torna-se necessário percorrer distâncias maiores e gastar mais tempo para ter acesso a água potável e alimento.

O evento composto de seca-calor que ocorreu em 2018 no hemisfério Norte causou a redução dos níveis dos rios, impactando a navegação fluvial nas principais vias fluviais europeias,

com consequências para o transporte de mercadorias críticas. O extremo climático também afetou o transporte ferroviário, uma vez que os trilhos dos trens dobraram e as estradas derreteram, devido ao calor prolongado (Vogel et al., 2018; Simpson et al., 2021; Niggli et al., 2022).

Na Austrália, a seca prolongada de 2000 a 2009 levou o país a uma crise hídrica, causando problemas de abastecimento de água que foram agravados quando as estações de tratamento de água foram afetadas pela evaporação, cortes de energia e avarias de bombas durante a onda de calor extrema de 2009 (Yuo et al., 2015). Além disso, tanto na Europa como na Austrália, o calor extremo também causou danos ao transporte rodoviário, por meio da aderência do betume aos pneus (Vogel et al., 2018, Niggli et al., 2022).

No Brasil, os impactos de eventos compostos de seca e calor (CSC) sobre os sistemas de transporte são particularmente preocupantes. Na região amazônica, por exemplo, secas severas combinadas com calor extremo, como as ocorridas entre 2023 e 2024, levaram à queda histórica dos níveis dos rios Negro e Madeira, inviabilizando a navegação e isolando comunidades inteiras. Esse colapso da navegabilidade gerou desabastecimento de alimentos, combustíveis e medicamentos em cidades do Norte, além de encarecer o transporte de mercadorias essenciais, com reflexos negativos no sistema produtivo da Zona Franca de Manaus (AdaptaBrasil MCTI, 2023). Além disso, a maior incidência de incêndios, amplificada pela vegetação seca e baixa umidade do ar, resultou no bloqueio temporário de rodovias e ferrovias em estados como Mato Grosso, Pará e São Paulo, dificultando o escoamento de safra e o transporte intermunicipal (AdaptaBrasil MCTI, 2023).

## A AVALIAÇÃO DO RISCO POTENCIAL DE IMPACTOS DOS EVENTOS CSC SOBRE A INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTE NO BRASIL

Eventos compostos são caracterizados pela ocorrência simultânea ou sequencial de dois ou mais extremos climáticos que, quando combinados, podem gerar impactos mais severos do que

os eventos isolados (Zscheischler et al., 2020). Para a análise apresentada neste capítulo, a identificação dos eventos CSC foi baseada na combinação dos índices padronizados de precipitação (SPI) e de temperatura (STI), calculados a partir de diferentes conjuntos de dados meteorológicos globais. Para a precipitação, foram utilizados os conjuntos CRU (Harris et al., 2020), TerraClimate (Abatzoglou et al., 2018), ERA5 (Hersbach et al., 2023), CHIRPS (Funk et al., 2015) e PERSIANN-CDR (Ashouri et al., 2015); e, para a temperatura, os conjuntos CRU (Harris et al., 2020), TerraClimate (Abatzoglou et al., 2018) e ERA5 (Hersbach et al., 2023). Os dados mensais foram harmonizados em uma grade comum de 0,25° x 0,25° de latitude/longitude, no período de 1981 a 2024, utilizando o método de remapeamento conservativo de primeira ordem.

A definição adotada para eventos compostos de seca e calor considera que eles ocorrem quando o SPI é inferior a -0,8 e o STI é superior a 0,8, limiares que apresentam maior correlação com impactos observados na agricultura, vegetação e recursos hídricos do que limiares mais extremos. Essa abordagem busca capturar condições de estresse moderado, porém mais frequentes, que também podem representar riscos relevantes aos sistemas socioambientais (Cunha et al., 2024).

O índice foi processado sobre uma grade espacial para o Brasil, com resolução de 0.25°, considerando o período de 1981 a 2024. A partir da série temporal dos eventos CSC, calculou-se a frequência e duração desses eventos. A frequência foi definida como a razão entre o número de meses em que o índice composto assume valores positivos (CSC > 0) e o total de meses analisados, expressa em porcentagem (%). O cálculo foi feito individualmente para cada célula da grade, permitindo capturar a ocorrência relativa de eventos compostos em cada localidade. Foram computadas frequências médias anuais, considerando todo o período de análise. Esse critério baseia-se na suposição de que valores positivos do índice indicam a presença simultânea de condições de seca e calor, como pode ser observado na fórmula abaixo:

$$f = (\frac{n}{N})X100 \qquad \text{(Equação 1)}$$

Em que:

$f$ é a frequência percentual de ocorrência de eventos extremos (%);

$n(>0)$ é o número de meses com valor do índice composto estritamente maior que zero;

**N** é o número total de meses válidos.

A duração média foi definida como o número médio de meses consecutivos em que o *índice* composto permaneceu acima de zero (CSC > 0). Para cada célula, identificaram-se todas as sequências contínuas de meses com valores positivos do índice, registrando-se a duração de cada uma delas. A média dessas durações ao longo do período foi então calculada (Equação 2), refletindo a persistência típica dos eventos compostos em cada local.

$$D = \frac{\sum_{i=1}^{n} d_i}{N} \qquad \text{(Equação 2)}$$

$d\,i$ = duração do i -ésimo evento de índices compostos

A avaliação do risco potencial de impactos dos eventos CSC sobre a infraestrutura rodoviária considerou a sobreposição entre a exposição climática (frequência de eventos CSC) e a importância das rodovias (fluxo de carga). Para representar essa importância, foi utilizado o Volume Diário Médio Anual (VDMA) do ano de 2023[1], que é um indicador amplamente utilizado nos estudos sobre tráfego, segurança viária, planejamento e modelagem (Silva e Ferraz, 2020; Cunha e Oliveira, 2021; Paiva e Russo, 2024; Nunes et al., 2023).

Os valores de VDMA foram tratados com a remoção de outliers pelo método do intervalo interquartil (IQR), a fim de eliminar os trechos com movimento atipicamente alto ou baixo, que, para esse caso, os valores foram, respectivamente, 15.149,5 e -5.262,5 (embora não tenha valores de VDMA negativo). Em seguida, tanto o VDMA quanto a frequência dos eventos compostos (CSC)

1 Disponível em: https://servicos.dnit.gov.br/dadospnct#downloads

foram normalizados, utilizando o método Min-Max (Equação 3), que transforma os valores para uma escala entre 0 e 1, a fim de preservar as proporções relativas entre os dados e, ao mesmo tempo, deixá-los na mesma escala, a fim de futura composição do risco.

$$Xnorm = \frac{X - Xmin}{Xmax - X\,min} \qquad \text{(Equação 3)}$$

Em que:

**Xnorm** é à variável normalizada;
**X** é à variável no trecho;
**Xmin** é o valor mínimo da variável;
**Xmax** é o valor máximo da variável.

A estimativa do risco potencial foi realizada por meio da média aritmética simples entre os dois indicadores normalizados, resultando no risco potencial de impactos dos eventos compostos (CSC), que representa o grau de exposição da infraestrutura rodoviária às condições climáticas extremas e sua relevância funcional em função do volume de veículos terrestres. O resultado reflete áreas que podem apresentar uma maior suscetibilidade a impactos, considerando a intensidade do fluxo versus a recorrência de eventos extremos (CSC).

De acordo com a Figura 2, as principais rodovias com maior risco potencial de impactos estão localizadas nas regiões Sudeste e Nordeste do país. Na região Sudeste, o risco é mais elevado devido ao maior VDMA, aliado à alta frequência de eventos compostos de seca e calor. Essas áreas estão suscetíveis tanto ao aumento do risco de propagação de fogo nas proximidades das rodovias — o que contribui para a redução da visibilidade — quanto a danos de longo prazo nas estradas pavimentadas, resultantes do efeito combinado da baixa umidade e calor intenso. Já nas rodovias do Nordeste e de algumas da Região Norte, o risco é maior devido, principalmente, à maior frequência de eventos compostos de seca-calor.

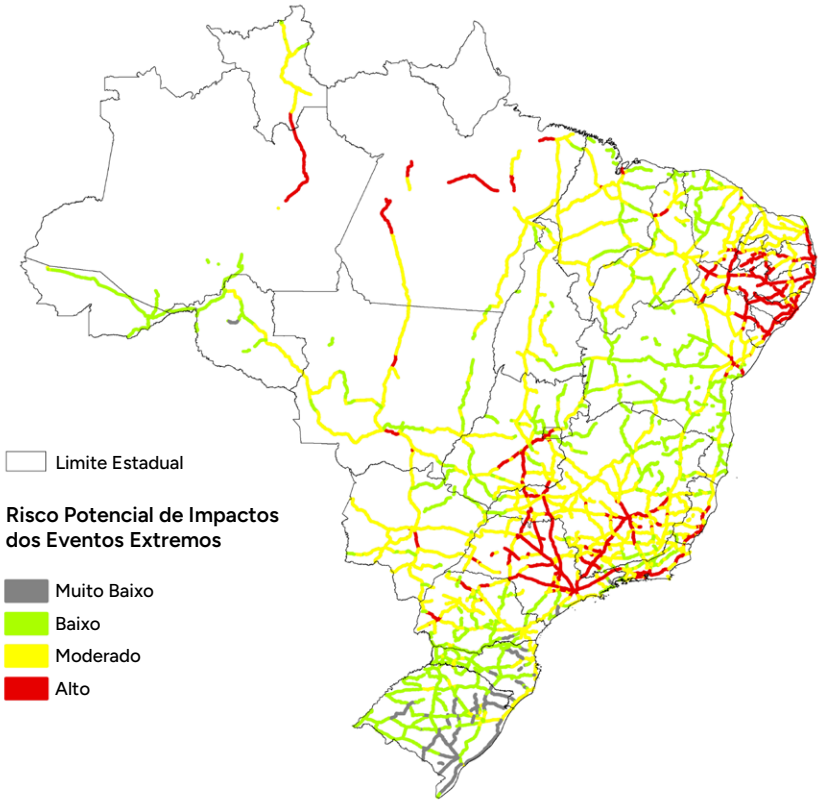



**Figura 2:** Mapa do Risco Potencial de Impactos de eventos compostos de seca-calor na infraestrutura de transporte rodoviário.

*Fonte: Elaboração própria.*

A metodologia aplicada às hidrovias buscou identificar o *trade-off* entre produtividade econômica e vulnerabilidade climática frente à recorrência de eventos compostos de seca e calor. A produtividade foi calculada com base no valor transportado por quilômetro (R$/km), utilizando os dados de carga registrados no ano de 2025 (ANTAQ, 2025), de modo a representar a importância econômica recente de cada hidrovia. Para mensurar a exposição climática, foi utilizada a soma das frequências de eventos compostos com diferentes janelas de acúmulo (de 4 a 18 meses), representando a intensidade total de exposição a extremos combinados

ao longo do tempo (Figura 3). Esses dois indicadores foram então normalizados por meio do *z-score*, o que possibilitou compará-los diretamente, ao eliminar o efeito das diferentes escalas numéricas e destacar desvios em relação à média.

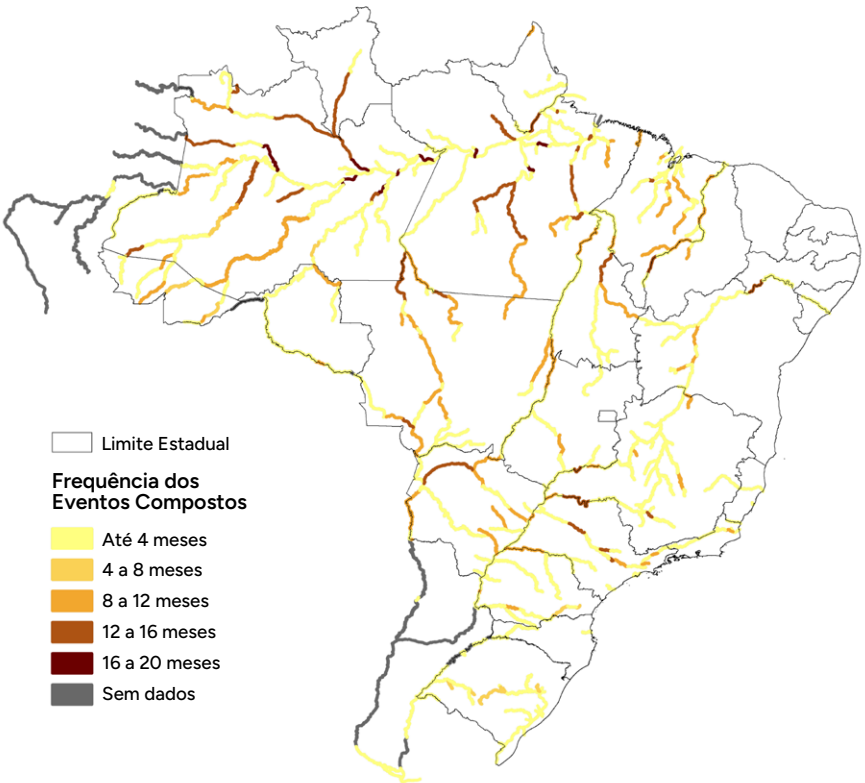



**Figura 3:** Mapa da frequência de eventos compostos de seca-calor na infraestrutura de transporte hidroviário. *Fonte: Elaboração própria.*

Com os valores normalizados, cada hidrovia foi classificada em um dos quatro quadrantes do *trade-off*: alta ou baixa produtividade, combinada com alta ou baixa vulnerabilidade. Essa categorização permitiu identificar rios com desempenho positivo, mas expostos a riscos climáticos relevantes, bem como aqueles pouco produtivos e altamente vulneráveis, que podem demandar atenção

diferenciada em políticas públicas. O resultado final fornece uma visão integrada da relevância econômica e da exposição a riscos climáticos, contribuindo para a priorização de ações de adaptação e investimentos em infraestrutura de transporte fluvial (Figura 4).

A análise das hidrovias brasileiras mostra os contrastes existentes entre a produtividade e à vulnerabilidade. Rios como o Madeira, Tapajós, Tocantins e Amazonas aparecem com alta vulnerabilidade (Figura 4), o que pode comprometer a navegabilidade em períodos de seca prolongada (Freitas Júnior et al., 2024). O deslocamento de Porto Velho para Itacoatiara, feito pelo Rio Madeira, no período de cheia tem como tempo de viagem 60 horas, com capacidade para 12 balsas carregada. Em contrapartida, no período seco o tempo de deslocamento sobe para 92 horas e a capacidade cai para 9 balsas carregadas (Freitas Júnior, 2024). Eventos de CSC podem impactar ainda mais o deslocamento e a capacidade de carga.

O Rio Solimões, também parte da Hidrovia- Solimões-Amazonas, por sua vez, possuí uma baixa produtividade de uma alta vulnerabilidade (Figura 4). Durante a última seca histórica na região (entre 2023 e 2024), conforme dados da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA), o Rio Solimões atingiu, em setembro de 2024, o nível mais baixo já registrado, chegando a -1,4 metro (abaixo da régua de medição). Esse evento resultou no isolamento de municípios e comunidades indígenas, dificultando a chegada de ajuda humanitária. Além disso, os custos operacionais do transporte fluvial aumentaram, o que provocou uma elevação nos preços das passagens, que quase dobraram em comparação aos períodos normais, enquanto o acesso à água foi gravemente comprometido.

A Figura 4 indica que o Rio Amazonas, pertencente à Hidrovia Solimões-Amazonas, apresenta a maior produtividade, mas também a maior vulnerabilidade aos eventos compostos de seca e calor. É importante destacar que, para uma análise mais aprofundada dos efeitos desses eventos na hidrovia, é fundamental considerar também as áreas de maior contribuição para a bacia hidrográfica, o que não foi abordado no presente trabalho.

**Figura 4:** Mapa que ilustra o trade-off entre produtividade econômica e vulnerabilidade climática em face da recorrência de eventos compostos de seca e calor. *Fonte: Elaboração própria.*

## DISCUSSÕES FINAIS

Considerando a necessidade de estudos sobre os impactos de extremos climáticos em infraestruturas essenciais, este estudo visa avaliar o risco associado a secas e eventos compostos seca-calor (CSC) nos sistemas de transportes nacionais. Tais fenômenos, intensificados pelas mudanças climáticas, representam ameaças multidimensionais que podem afetar os ecossistemas, as atividades econômicas, as seguranças hídricas, energéticas, alimentar e, particularmente, as infraestruturas de transporte.

Na matriz de transportes do Brasil, o modal rodoviário representa a maior participação no setor, contando com 61,1% das cargas, seguido do ferroviário, com 20,7% e do aquaviário, com 13,6%. O transporte hidroviário no país aproveita comercialmente (para cargas e passageiros) cerca de 20 mil km (30,9%) de uma malha total de 63 mil km de rios (CNT, 2019).

Na Região Norte, a navegação fluvial é essencial, onde os rios representam o principal meio de transporte, sendo cruciais para o deslocamento e o abastecimento sobretudo das comunidades ribeirinhas. A hidrovia Solimões-Amazonas, que é uma das maiores hidrovias do mundo, é caracterizada pela navegação de travessia, de cargas e de passageiros, de cabotagem e de longo curso. A hidrovia costuma ser navegável durante o ano todo; no entanto, em períodos de seca prolongada, alguns trechos podem apresentar inviabilidade para navegação, além de baixa visibilidade em decorrência do aumento das queimadas.

A hidrovia Tietê-Paraná, uma das principais hidrovias em funcionamento no Brasil, inclui as regiões Sul, Sudeste e Centro-Oeste e faz parte da bacia do Rio da Prata. A seca ocorrida entre os anos de 2013 a 2015 na Região Sudeste causou a queda dos níveis dos rios, causando impactos significativos, incluindo a paralisação do transporte de cargas devido à inviabilidade para navegação e à priorização para garantir o abastecimento energético. A inviabilidade para navegação fez com que, nos anos de 2014 e 2015, o valor movimentado na Hidrovia Tietê-Paraná tivesse uma queda de mais 37% em relação à média de valores movimentados nos anos de 2012 e 2013 (R$4.331.650,66; ANTAQ, 2025). Tal paralisação causou prejuízos para a agricultura e forçou o uso de transporte rodoviário, mais caro e demorado (CNT, 2019).

Em relação ao sistema rodoviário, os eventos compostos de seca-calor também podem contribuir para impactos na visibilidade em decorrência do aumento da propagação do fogo em áreas próximas às rodovias, mas, a longo prazo, podem também contribuir para a degradação das superfícies pavimentadas, exigindo reparos frequentes.

Vários estudos já indicam que há fortes evidências de que as mudanças climáticas aumentarão o risco e a intensidade das secas em

todo o globo (IPCC, 2021; Cook *et al.*, 2020; Marengo *et al.*, 2021). De acordo com as projeções climáticas derivadas de um conjunto multimodelo do *Coupled Model Intercomparison Project Phase* 6 (CMIP6), até 2040 é esperado que as secas continuem sendo mais recorrentes e intensas em grande parte da região central do Brasil, ainda que considerando um dos cenários mais otimistas do IPCC. Além da seca, mesmo no cenário de baixas emissões em curto prazo, projeta-se um aquecimento entre 1 e 2oC já em 2030 em todo o país. Assim, as mudanças climáticas tendem a potencializar eventos compostos seca-calor, elevando riscos para setores produtivos e infraestruturas críticas. Nesse contexto, há necessidade de elaboração urgente de estratégias de adaptação para o setor de transportes.

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados deste estudo reforçam o crescente corpo de evidências que indicam a vulnerabilidade da infraestrutura de transportes brasileira frente às mudanças climáticas. Os eventos compostos de seca e calor tendem a comprometer a navegabilidade de hidrovias e a reduzir a vida útil das rodovias, devido à degradação térmica das superfícies e aos impactos indiretos de queimadas e incêndios florestais. Projeções recentes indicam que a infraestrutura de transportes já apresenta impactos diretos decorrentes de extremos climáticos no país, o que demanda ações urgentes de adaptação setorial.

Nesse sentido, políticas públicas e investimentos voltados à resiliência climática são imprescindíveis para proteger os ativos de transporte e garantir a continuidade das cadeias logísticas nacionais. Medidas como o aprimoramento de sistemas de monitoramento hidrometeorológico, o planejamento de rotas alternativas, e o fortalecimento das estruturas fluviais e rodoviárias frente ao estresse térmico e hídrico serão determinantes para mitigar prejuízos socioeconômicos futuros. Assim, este trabalho contribui ao evidenciar que a integração de análises climáticas em estratégias de planejamento é essencial para assegurar a funcionalidade e a segurança dos sistemas de transporte brasileiros diante do avanço das mudanças climáticas.

# REFERÊNCIAS


ABATZOGLOU, J. T.; DOBROWSKI, S. Z.; PARKS, S. A.; HEGEWISCH, K. C. **TerraClimate, a high-resolution global dataset of monthly climate and climatic water balance from 1958–2015**. Scientific Data, [S.l.], v. 5, p. 170191, 2018. DOI: https://doi.org/10.1038/sdata.2017.191.

ADAPTA BRASIL MCTI. Disponível em: https://adaptabrasil.mcti.gov.br/, Acesso em 29 de julho de 2025.

ANTAQ – Agência Nacional de Transportes Aquaviários. **Estatístico Aquaviário: carga por região hidrográfica, hidrovia e rio – Base de dados**. Disponível em: https://web3.antaq.gov.br/ea/sense/download.html. Acesso em: 301 jul. 2025.

ASHOURI, H. et al. **PERSIANN-CDR: Daily precipitation climate data record from multisatellite observations for hydrological and climate studies**. Bulletin of the American Meteorological Society, [S.l.], v. 96, n. 1, p. 69–83, 2015. DOI: https://doi.org/10.1175/BAMS-D-13-00068.1.

CNT, C. N. dos T. **Aspectos gerais da navegação interior no Brasil**. 1. ed. Brasília: s. n., 2019. v. 01.

CEMADEN, 2024. Disponível em: https://www.gov.br/cemaden/pt-br/assuntos/monitoramento/boletim-de-impactos. Acesso em 30 de julho de 2025.

CUNHA, A.P.M.A., BUERMANN, W.; MARENGO, J.A. **Changes in compound drought-heat events over Brazil's Pantanal wetland: an assessment using remote sensing data and multiple drought indicators**. ClimDyn 62, 739–757 (2024). https://doi.org/10.1007/s00382-023-06937-x

CUNHA, H., C.; OLIVEIRA, R., F. **Dimensionamento de um Pavimento Flexível entre os Municípios de Monte Carmelo e Abadia dos Dourados**. Revista GeTeC, v. 10, n. 26, 2021.

FREITAS JÚNIOR, M. et al. **Transporte hidroviário, um estudo das hidrovias brasileiras e suas principais características**. Observatório de la Economía Latinoamericana, Curitiba, v. 22, n. 1, p. 2642-2664, 2024. DOI: 10.55905/oelv22n1-137

FUNK, C. et al. **The climate hazards infrared precipitation with stations—a new environmental record for monitoring extremes**. Scientific Data, [S.l.], v. 2, p. 150066, 2015. DOI: https://doi.org/10.1038/sdata.2015.66.

HARRIS, I. et al. **Version 4 of the CRU TS monthly high-resolution gridded multivariate climate dataset. Scientific Data**, [S.l.], v. 7, p. 109, 2020. DOI: https://doi.org/10.1038/s41597-020-0453-3.

HERSBACH, H. et al. **ERA5: Fifth generation of ECMWF atmospheric reanalyses of the global climate**. CopernicusClimateChange Service (C3S) Climate Data Store, 2023. Disponível em: https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/reanalysis-era5-single-levels-monthly-means. Acesso em: 29 jul. 2025.

NIGGLI, L.; HUGGEL C.; MUCCIONE V.; NEUKOM, R.; SALZMANN, N. (2022) **Rumo a uma melhor compreensão dos riscos em cascata e interconectados de extremos climáticos simultâneos: Análise de eventos históricos de calor e seca**. PLOS Clim 1(8): e0000057. https://doi.org/10.1371/journal.pclm.0000057

NJOGU, H. W. (2022). **Effects of droughts on the delivery of infrastructure services in Kenya**. Natural ResourcesForum, 46(2), 221-244. https://doi.org/10.1111/1477-8947.12251

NUNES, P. B. S.; CUNTO, F. J.C.; MARQUES, S.F. **Estimação do volume de tráfego em interseções de Fortaleza com base na krigagem universal**. In: CONGRESSO DE PESQUISA E ENSINO EM TRANSPORTES – ANPET, 37., 2023, Santos-SP. Anais... Santos: ANPET, 2023.

PAIVA, V.; RUSSO, M. R.A. **Identificação de trecho rodoviário com alto índice de acidentes e proposta de soluções – estudo de caso**. In: ENCONTRO NACIONAL DE CONSERVAÇÃO RODOVIÁRIA (ENACOR), 26.; REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO (RAPv), 49., 2024, Aracaju. Anais... Aracaju: DNIT/ABPv, 2024. DOI: 10.29327/1430212.49-85.

SEITZ, Z. **From Floods to Heatwaves: Strengthening Urban Transport amidst Changing Climate – Experiences from China on Climate-Proofing Urban Mobility Systems**.

Bonn/Eschborn: Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH, 2025. Disponível em: https://changing-transport.org/wp-content/uploads/2025_From-floods-to-heatwaves_Stregthening-Urban-Transport.pdf. Acesso em: 23 jul. 2025.

SILVA, K.C.R.; FERRAZ, A.C.P. **Transferabilidade e aplicação do modelo de previsão de acidentes do HSM para segmentos de rodovias de pista simples. Anais do 35º Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes – ANPET**, Online, 2020.

SIMPSON N.P.; et al. **A framework for complex climate change risk assessment**. One Earth. 2021.

SMITH, K.; et al. **Baseline Assessment of Drought Impact Monitoring; Integrated Drought Management Programme (IDMP), Integrated Drought Management Tools and Guidelines Series 3**; World Meteorological Organization (WMO) and Integrated Drought Management Programme (IDMP): Geneva, 2025.

UNITED NATIONS CONVENTION TO COMBAT DESERTIFICATION (UNCCD). **Drought in Numbers 2022**; UNCCD, 2022. https://www.unccd.int/sites/default/files/2022-06/Drought%20in%20Numbers%20%28English%29.pdf.

UNITED NATIONS OFFICE FOR DISASTER RISK REDUCTION (UNDRR) (2021). **GAR Special Report on Drought 2021**. Geneva.

UNITED STATES. NATIONAL INTEGRATED DROUGHT INFORMATION SYSTEM (NIDIS). **Drought Impacts on Navigation and Transportation**. Washington, D.C.: U.S. Drought Portal, [2023?]. Disponível em: https://www.drought.gov/sectors/navigation-and-transportation. Acesso em: 23 jul. 2025.

VICENTE-SERRANO, S.M.; BEGUERÍA, S.; LÓPEZ-MORENO, J.I. **A multiscalar drought index sensitive to global warming: The Standardized Precipitation Evapotranspiration Index**. Journal of Climate, v. 23, p. 1696–1718, 2010. DOI: 10.1175/2009JCLI2909.1.

VOGEL MM et al. (2019). **Concurrent 2018 Hot Extremes Across Northern Hemisphere Due to Human-Induced Climate Change**. Earth's Future. 2019;7(7):692–703. pmid:31598535

WHO. (2021). Drought Overview. WHO website. https://www.who.int/health-topics/drought#

WILHITE, Donald A.; GLANTZ, Michael H. **Understanding the drought phenomenon: the role of definitions**. Water International, v. 10, n. 3, p. 111–120, 1987.

WMO – WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION. **Drought. Geneva: WMO**, 2020. Disponível em: https://wmo.int/about-us/world-meteorological-day/wmd-2020/drought. Acesso em: 29 jul. 2025.

WMO. (2021). **WMO Atlas of Mortality and Economic Losses from Weather, Climate and Water Extremes** 1970–2019. https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=10902

ZSCHEISCHLER J. et al. (2020) **A typology of compound weather and climate events**. Nat Rev Earth Environ 1(7):333–347. https://doi.org/10.1038/s43017-020-0060-z

ZUO, J. et al. **Impactos das ondas de calor e medidas correspondentes: uma revisão**. J Clean Prod [Internet]. 2015;92:1–12. Disponível em: http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.12.078 Acesso em: 29 jul.2025.

5

# *DROUGHTS IN BRAZIL AND IMPACTS ON INFRASTRUCTURE*

ANA PAULA M. A. CUNHA,
LIDIANE CRISTINA OLIVEIRA COSTA,
MÁRCIA REGINA GUIMARÃES GUEDES,
NELSON P. A. MATEUS
E SUELEN ROBALLO FISCHER.

## *SUMMARY*

The risk of drought, or events combining drought and heat (compostos de seca e calor – CSC), can have significant impacts on livelihoods, productive sectors, ecosystems and infrastructure. In recent years, much of Brazil has faced more frequent and intense droughts, which has also affected the waterway transport system. The reduction in river levels due to prolonged water shortages compromises navigability, limits the operational capacity of ports and vessels, and increases logistics costs. This chapter presents a simplified analysis of the potential risk of CSC events, focusing on the country's road, rail, and waterway transport systems. The results point to greater vulnerability to CSC events in stretches of highways in the Southeast and Northeast regions. In the waterway system, the Solimões-Amazonas Waterway emerges as the most critical area. The historic drought of 2023-2024 in Amazônia highlighted this vulnerability, highlighting the need for preventive and adaptation actions.

**Keywords**

Drought, climate extremes, transport systems

## INTRODUCTION

Drought is a climatic extreme associated with low water availability caused by the deficit of precipitation compared to normal conditions and is often exacerbated by increased atmospheric water demand following high temperatures or strong winds (WMO, 2020; UNDRR, 2021). It is important to note that the effects of drought accumulate slowly over time, and can persist for months or years after rainfall returns to its average levels.

Drought events can result in disasters when water demand cannot be met, causing water imbalance for various human activities (Wilhite and Glantz, 1987, UNDRR, 2021). Thus, drought is configured as a risk when there is a decrease in the capacity of various systems to deal with the water deficit (Cunha *et al.*, 2018, 2019). This risk can result in impacts on people's livelihoods, productive sectors, ecosystem health, human and animal life, tourism, transportation, among others (Cunha *et al.*, 2019; Marengo *et al.*, 2021; Cuartas *et al.*, 2022, WMO, 2021).

Between 1970 and 2019, droughts caused more than 700,000 deaths—mostly in Africa – disproportionately affecting women and girls (UNCCD, 2022). Economic losses caused by drought have multiplied in recent decades (WMO, 2021). An estimated 55 million people worldwide are directly affected by drought every year, making it a major climate threat to production systems across the globe (WHO, 2021).

Since the 1990s, droughts have become more frequent and intense in Brazil (more negative and consecutive SPEI values, Figure 1). The Standardized Precipitation and Evapotranspiration Index (SPEI) is an index that takes into account both precipitation and potential evapotranspiration, estimated based on air temperature, providing an integrated measure of water availability and climatic conditions in a region, and serving as a simple way to account for deviations from the water balance of a given location (Vicente-Serrano *et al.*, 2010).

According to SPEI data, Brazil faced three major droughts (consecutive negative SPEI peaks, below -1.0): the first between

1997 and 1998; the second, between 2015 and 2016; and the last, in 2023 and 2024. It is worth mentioning that the drought of 2015-2016 surpassed that of 1997-1998, but the most recent one, of 2023-2024, had more negative SPEI values, indicating that it was the most intense in the historical record.

Data from the National Center for Monitoring and Alerts of Natural Disasters (Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais – CEMADEN, 2024) show that, in 2024, more than half of Brazil suffered the direct impacts of drought. The Amazon, Cerrado and Pantanal biomes, in particular, faced the worst drought in the last 70 years. By September 2024, approximately 1,200 municipalities in Brazil were experiencing severe drought conditions, and 263 municipalities were facing extreme drought. The rainfall deficit observed since the spring of 2023 across such a vast area of Brazil (covering the North to Southeast regions of the country) and the occurrence of high temperatures, heat waves, and low relative humidity of the air—which reached values close to 7% in part of the Midwest region—fueled the spread of wildfires in these regions.

It is important to highlight that this scenario was due not only to the rainfall deficit, but also the simultaneous occurrence of drought and heatwave events, especially between the years 2023 and 2024. The occurrence of combined drought-heat events has increased in recent years and, according to climate change projections, will continue to increase in the coming decades (Zscheischler *et al.*, 2018, 2020; Vogel *et al.*, 2020; IPCC 2021).

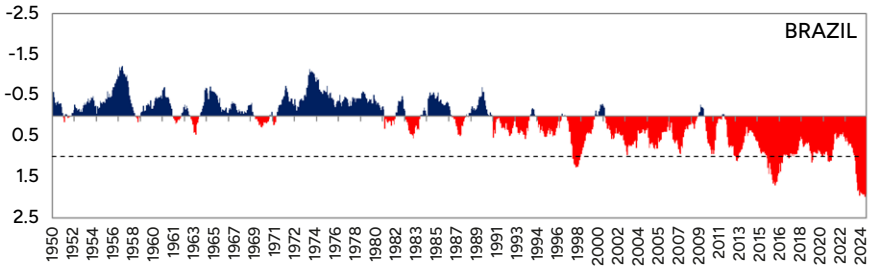



**Figure 1:** Temporal evolution of droughts in Brazil considering the Standardized Precipitation and Evapotranspiration Index (SPEI) from 1951 to 2024. The blue

bars indicate years in which precipitation was greater than evapotranspiration (positive water balance), indicating wetter periods, with greater water availability, while the red bars indicate years in which evapotranspiration was greater than precipitation (negative water balance), resulting in drier conditions, with less water availability. *Source: prepared by the authors from SPEI data: Vicente-Serrano et al., 2010, post-processing and analysis: CEMADEN/MCTI.*

Unlike other types of climate-related threats, droughts are usually silent and are often noticed too late—by which time the impacts already become irreversible, especially those of an indirect nature. Direct impacts occur through interactions between water scarcity and various environmental, social or economic components, such as insufficient public water supply, crop failure, reduced forest production, greater risk of wildfire, impacts on navigation due to low river levels, impacts on industrial production, among others. On the other hand, indirect impacts of droughts are those that are not a direct result of water scarcity and are usually produced at a distance from the drought-affected region or as a result of a complex chain of effects. Since they are usually silent, the indirect effects of droughts can spread rapidly throughout the economic system. Indirect impacts are those related to some ecosystem services, biodiversity, health, food prices, infrastructure, among others (UNDRR, 2021, Niggli *et al.*, 2022). In this chapter, the impacts of droughts will be analyzed from the perspective of infrastructure.

## *DROUGHT RECURRENCE AND INFRASTRUCTURE*

In recent decades, urban mobility systems have proven increasingly vulnerable to the impacts of extreme weather events, such as prolonged droughts, intense heat waves, flooding, and severe storms. When these phenomena strike urban centers, they trigger operational failures, damage to road infrastructure and interruptions in transportation services, which endanger public safety and compromises the socioeconomic dynamics of cities. This scena-

rio is exacerbated by the intensification of climate change, which has amplified both the frequency and magnitude of these events, making it even more urgent to strengthen the resilience and adaptive capacity of urban transportation networks (SEITZ, 2025).

Extreme drought conditions have profound effects on transportation systems, especially those that rely on rivers and waterways. The sharp drop in water levels in watercourses during periods of drought compromises navigability and reduces the operational capacity of ports and vessels, significantly increasing logistics costs.

In addition to the impact on waterways, the secondary effects of drought—such as rising temperatures—exacerbate the vulnerability of land and airport infrastructure. Excessive heat can deform pavements, soften the asphalt of airstrips and lead to warping of railway tracks, increasing the risk of accidents and service interruptions. Another risk associated with drought is soil subsidence, caused by the intensive extraction of groundwater, which can damage roads, supply networks, and urban structures. The increased risk of wildfires during these periods also poses a threat to the visibility and safety of highways and airports, requiring the adoption of emergency measures to ensure the continuity of transport in contexts of prolonged climate crisis (UNITED STATES, 2023).

Njogu (2022) demonstrated how droughts can affect the availability and quality of infrastructure services—including energy, water, housing, and communications—in Kenya. During droughts, infrastructure is exposed to greater risks of structural damage and deterioration, leading to increased maintenance costs. As a result, people often have to travel longer distances and spend more time to access drinking water and food.

The combined drought-heat event that occurred in 2018 in the Northern Hemisphere caused river levels to drop, impacting river navigation on major European waterways, with consequences for the transport of critical goods. The weather extreme also affected rail transport, as train tracks buckled and roads melted due to prolonged heat (Vogel *et al.*, 2018; Simpson *et al.*, 2021; Niggli *et al.*, 2022).

In Australia, the prolonged drought from 2000 to 2009 led the country into a water crisis, causing water supply problems that were exacerbated when water treatment plants were affected by evaporation, power outages, and pump failures during the extreme heat wave of 2009 (Yuo *et al.*, 2015). In addition, in both Europe and Australia, extreme heat also caused damage to road transport by causing asphalt to stick to tires (Vogel *et al.*, 2018, Niggli *et al.*, 2022).

In Brazil, the impacts of combined heat and drought events (CSC) on transportation systems are particularly concerning. In the Amazon region, for example, severe droughts combined with extreme heat—such as those that occurred between 2023 and 2024—led to a historic drop in the levels of the Negro and Madeira rivers, making navigation unfeasible and isolating entire communities. This collapse in navigability caused shortages of food, fuel, and medicines in cities in the North, in addition to increasing the cost of transporting essential goods, with negative effects on the production system of the Manaus Free Trade Zone (AdaptaBrasil MCTI, 2023). Furthermore, the increased incidence of fires, amplified by dry vegetation and low air humidity, resulted in temporary blocking of highways and railways in states such as Mato Grosso, Pará, and São Paulo, hindering the transport of crops and intercity transportation (AdaptaBrasil MCTI, 2023).

## *THE ASSESSMENT OF THE POTENTIAL RISK OF IMPACTS OF SSC EVENTS ON TRANSPORT INFRASTRUCTURE IN BRAZIL*

Combined events are characterized by the simultaneous or sequential occurrence of two or more climate extremes that, when combined, can cause more severe impacts than isolated events (Zscheischler *et al.*, 2020). For the analysis presented in this chapter, the identification of the CSC events was based on the combination of standardized precipitation (SPI) and temperature (STI) indices, calculated from different global meteorological datasets. For pre-

cipitation, the CRU (Harris *et al.*, 2020), TerraClimate (Abatzoglou *et al.*, 2018), ERA5 (Hersbach *et al.*, 2023), CHIRPS (Funk *et al.*, 2015) and PERSIANN-CDR (Ashouri *et al.*, 2015); and for temperature, the CRU (Harris *et al.*, 2020), TerraClimate (Abatzoglou *et al.*, 2018) and ERA5 (Hersbach *et al.*, 2023) datasets. The monthly data were harmonized in a common 0.25° x 0.25° latitude/longitude grid for the period from 1981 to 2024, using the first-order conservative remapping method.

The definition adopted for combined drought and heat events considers that they occur when the SPI is below -0.8 and the STI is above 0.8—thresholds that show a stronger correlation with observed impacts on agriculture, vegetation and water resources than more extreme thresholds. This approach seeks to capture conditions of moderate but more frequent stress, which are more frequent but can also pose relevant risks to socio-environmental systems (Cunha *et al.*, 2024).

The index was processed on a spatial grid for Brazil, with a resolution of 0.25°, covering the period from 1981 to 2024. Based on the time series of the CSC events, the frequency and duration of these events were calculated. Frequency was defined as the ratio of the number of months in which the composite index takes on positive values (CSC > 0) to the total number of months analyzed, expressed as a percentage (%). The calculation was done individually for each gird cell, allowing for the capture of the relative occurrence of composite events in each location. Annual average frequencies were computed, considering the entire period of analysis. This criterion is based on the assumption that positive values of the index indicate the simultaneous presence of drought and heat conditions, as can be seen in the formula below.

$$f = (\frac{n}{N})X100 \qquad \text{(Equation 1)}$$

In wich:

$f$ is the percentage frequency of occurrence of extreme events (%);

$n(>0)$ is the number of months with a composite index value strictly greater than zero

**N** is the total number of valid months;

The average duration was defined as the average number of consecutive months in which the composite index remained above zero (CSC > 0). For each cell, all continuous sequences of months with positive index values were identified, and the duration of each one was recorded. The average of these durations over the period was then calculated (Equation 2), reflecting the typical persistence of combined events at each region.

$$D = \frac{\sum_{i=1}^{n} d_i}{N} \qquad \text{(Equation 2)}$$

$d\,i$ = duration of the i -th event of composite indices

The assessment of the potential risk of CSC events impacting road infrastructure considered the overlap between climate exposure (frequency of CSC events) and the importance of highways (cargo flow). To represent this importance, the Annual Average Daily Volume (Volume Diário Médio Annual – VDMA) for the year 20231 was used, which is an indicator widely used in studies on traffic, road safety, planning, and modeling (Silva and Ferraz, 2020; Cunha and Oliveira, 2021; Paiva and Russo, 2024; Nunes et al., 2023).

The VDMA values were processed by removing outliers using the interquartile range (IQR) method in order to eliminate segments with atypically high or low movement; which for this case the values were, respectively, 15,149.5 and -5,262.5 (although there were no negative VDMa values). Then, both the VDMA and the frequency of composite events (CSC) were normalized using the

1 Available at: https://servicos.dnit.gov.br/dadospnct#downloads

Min-Max method (Equation 3), which transforms the values to a scale between 0 and 1, in order to preserve the relative proportions between the data and at the same time leave them on the same scale for future risk composition.

$$Xnorm = \frac{X - Xmin}{Xmax - X\ min} \qquad \text{(Equation 3)}$$

Where:

**Xnorm** is the normalized variable;
**X** is the variable in the range;
**Xmin** is the minimum value of the variable;
**Xmax** is the maximum value of the variable.

The potential risk was estimated using the simple arithmetic mean of the two normalized indicators, resulting in the potential risk of impacts from combined events (CSC), which represents the degree of exposure of the road infrastructure to extreme weather conditions and its functional relevance based on the volume of land vehicles. The result highlights areas that may be more susceptible to impacts, considering traffic intensity versus the recurrence of extreme events (CSC).

According to Figure 2, the main highways with the highest potential risk of impacts are located in the Southeast and Northeast regions of the country. In the Southeast, the risk is higher due to the higher VDMA, combined with the high frequency of events combined of drought and heat. These areas are susceptible both to an increased risk of fire spreading near highways—which contributes to reduced visibility—and to long-term damage to paved roads, resulting from the combined effect of low humidity and intense heat. On the highways in the Northeast and in some in the North, the risk is greater mainly due to the greater frequency of combined drought-heat events.

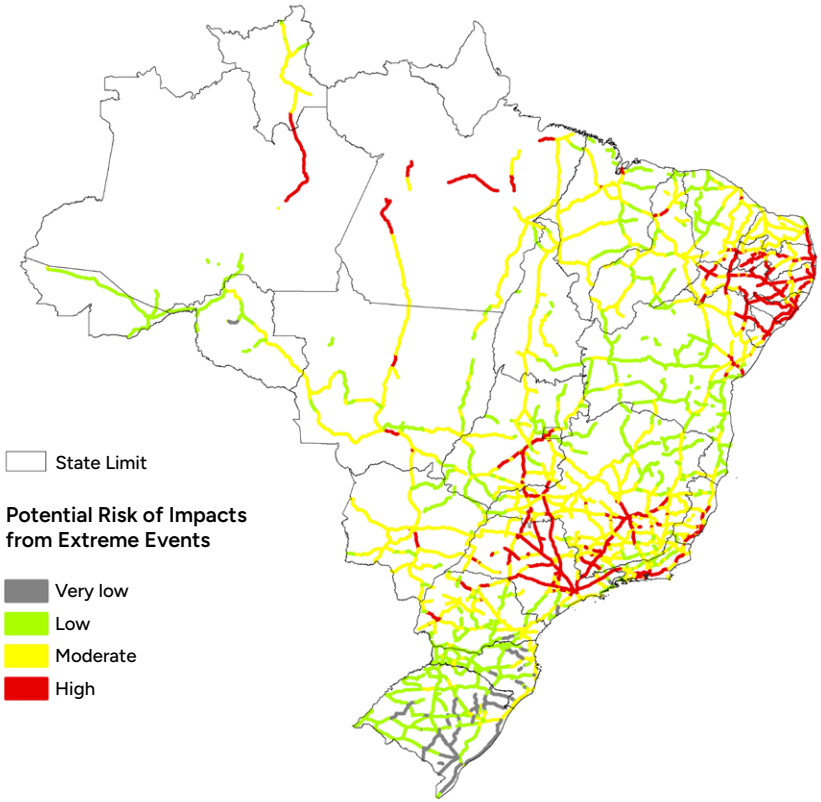



**Figure 2:** Map of the Potential Risk of Impacts of Compound Drought-Heat Events on Road Transport Infrastructure. *Source: Prepared by the authors.*

The methodology applied to waterways sought to identify the trade-off between economic productivity and climate vulnerability in the face of recurring drought and heat events. Productivity was calculated based on the value transported per kilometer (R$/km), using cargo data recorded in the year 2025 (ANTAQ, 2025), to represent the recent economic importance of each waterway. To measure climate exposure, the sum of the frequencies of combined events with different accumulation windows (from 4 to 18 months) was used, representing the total intensity of exposure to combined extremes over time (Figure 3). These two indicators were then normalized using the z-score, which allowed for direct

comparison by eliminating the effect of the different numerical scales and highlighting deviations from the mean.

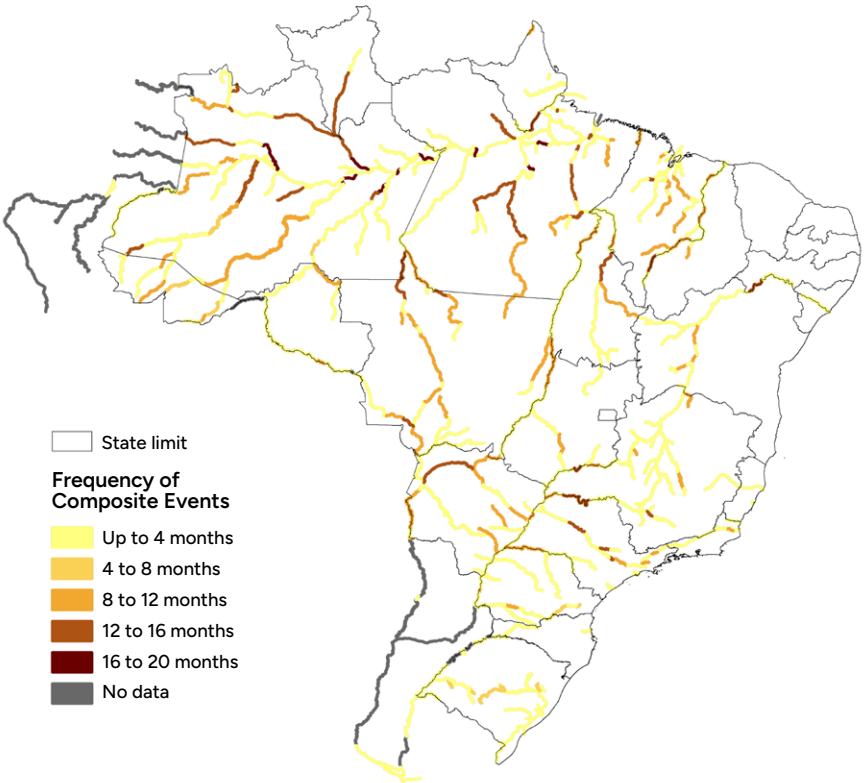



**Figure 3:** Map of the frequency of compound drought-heat events in waterway transport infrastructure. *Source: Prepared by the authors.*

Using the normalized values, each waterway was classified into one of the four quadrants of the trade-off: high or low productivity, combined with high or low vulnerability. This categorization made it possible to identify rivers with positive performance but exposed to relevant climate risks, as well as those that are not very productive and highly vulnerable, which may require special attention in public policies. The final result provides an integrated view

of economic relevance and exposure to climate risks, contributing to the prioritization of adaptation actions and investments in river transport infrastructure (Figure 4).

The analysis of Brazilian waterways reveals the contrasts between productivity and vulnerability. Rivers such as the Madeira, Tapajós, Tocantins, and Amazonas are highly vulnerable (Figure 4), which can compromise navigability in periods of prolonged drought (Freitas Júnior *et al.*, 2024). The journey from Porto Velho to Itacoatiara via the Madeira River during the flood season takes 60 hours, with a capacity for 12 loaded ferries. In contrast, during the dry season, travel time increases to 92 hours and capacity drops to 9 loaded ferries (Freitas Júnior, 2024). CSC events can further impact travel time and cargo capacity.

The Solimões River, which is also part of the Solimões-Amazonas Waterway, is characterized by low productivity and a high vulnerability (Figure 4). During the reion's most recent historic drought (between 2023 and 2024), according to data from the National Water and Basic Sanitation Agency (Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico – ANA), the Solimões River reached, in September 2024, the lowest level ever recorded, droping to -1.4 meters (below the measuring ruler). This event resulted in the isolation of municipalities and indigenous communities, hindering the delivery of humanitarian aid. In addition, the operational costs of river transport increased, which nearly doubled compared to normal periods, while access to water has been severely compromised.

Figure 4 shows that the Amazon River, part of the Solimões-Amazonas Waterway, has the highest productivity but also the greatest vulnerability to combined drought and heat events. It is important to highlight that, for a more in-depth analysis of the effects of these events on the waterway, it is essential to also consider the areas that contributes most to the river basin, an aspect not addressed in this study.

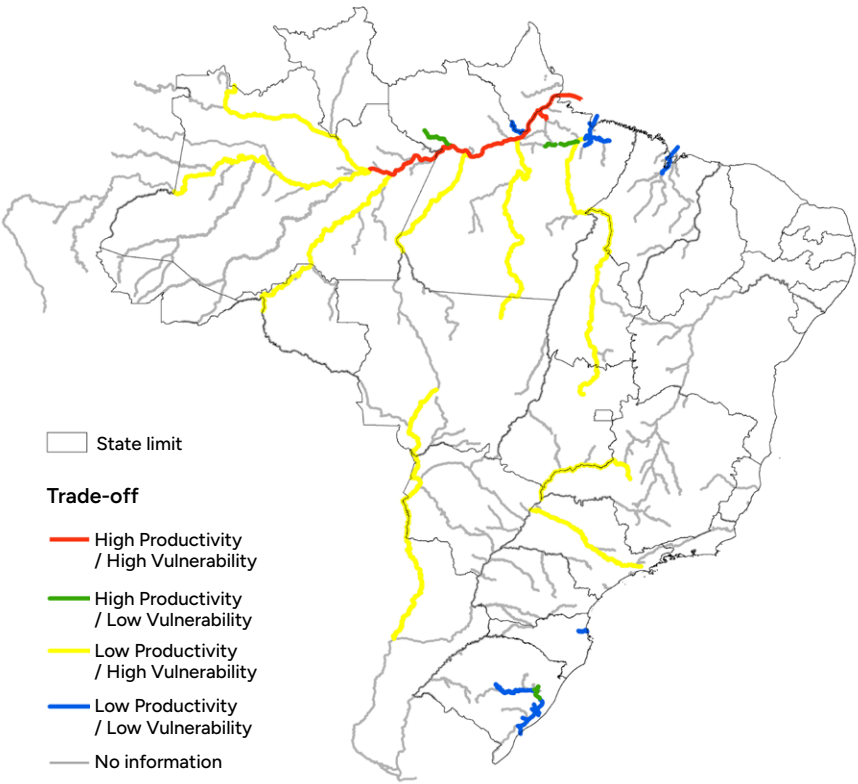



**Figure 4:** Map illustrating the trade-off between economic productivity and climate vulnerability in the face of the recurring drought and heat events.
*Source: Prepared by the authors.*

## *FINAL DISCUSSIONS*

Considering the need for studies on the impacts of climate extremes on essential infrastructures, this study aims to assess the risk associated with droughts and combined drought-heat events (CSC) in national transport systems. Such phenomena, intensified by climate change, represent multidimensional threats that can affect ecosystems, economic activities, water, energy, food security, and, in particular, transportation infrastructure.

In Brazil's transportation system, road transport represents the largest share of the sector, accounting for 61.1% of cargo, followed by rail transport, with 20.7%, and waterway transport,

with 13.6%. Waterway transport in the country takes commercial advantage (for cargo and passengers) of about 20,000 km (30.9%) of a total network of 63,000 km of rivers (CNT, 2019).

In the North Region, river navigation is essential, as rivers serve as the primary means of transportation and are crucial for travel and supply, particularly for riverside communities. The Solimões-Amazonas waterway, one of the largest in the world, is characterized by ferry service, cargo and passenger transport, coastal shipping, and long-distance navigation. The waterway is usually navigable year-roung; however, in periods of prolonged drought, some stretches may become unnavigable, in addition to low visibility due to increased wildfires.

The Tietê-Paraná waterway, one of the main operational waterways in Brazil, includes the South, Southeast, and Midwest regions and is part of the Río de la Plata basin. The drought that occurred between 2013 and 2015 in the Southeast Region caused the drop in river levels, resulting in significant impacts, including the suspension of cargo transport due to the unfeasibility of navigation and the prioritization of ensuring energy supply. The impossibility of navigation led to a drop of over 37% in the values of goods transported on the Tietê-Paraná Waterway in 2014 and 2015 compared to the average value transported in 2012 and 2013 (R$4,331,650.66; ANTAQ, 2025). This shutdown caused losses for agriculture and forced the use of road transport, which is more expensive and time-consuming (CNT, 2019).

Regarding the highway system, combined drought-heat events can also affect visibility due to the increased spread of fire in areas near highways; however, in the long term, they can also contribute to the deterioration of paved surfaces, requiring frequent repairs.

Several studies have already indicated that there is strong evidence that climate change will increase the risk and intensity of droughts worldwide (IPCC, 2021; Cook et al., 2020; Marengo *et al.*, 2021). According to climate projections derived from a multi-model set of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6), by 2040 droughts are expected to remain more frequent and intense across much of central Brazil, even under one of the IPCC's most optimistic scenarios. In addition to drought, even under a

low-emission scenario in the short term, warming of between 1 and 2°C is projected as early as 2030 across the country. Thus, climate change tends to potentiate combined drought-heat events, increasing risks for productive sectors and critical infrastructures. In this context, there is an urgent need to develop adaptation strategies for the transportation sector.

## FINAL THOUGHTS

The results of this study reinforce the growing body of evidence indicating the vulnerability of Brazilian transportation infrastructure to climate change. Combined drought and heat events tend to compromise the navigability of waterways and reduce the service life of highways, due to the thermal degradation of road surfaces and the indirect impacts of wildfires and forest fires. Recent projections indicate that the country's transportation infrastructure is already experiencing direct impacts from climate extremes, which calls for urgent sector-specific adaptation measures.

In this regard, public policies and investments focused on climate resilience are essential to protect transportation infrastructure and ensure the continuity of national logistics chains. Measures such as the improving hydrometeorological monitoring systems, planning alternative routes, and strengthening river and road structures to withstand thermal and water stress will be crucial for mitigating future socioeconomic losses. Thus, this study contributes by demonstrating that the integration of climate analysis in planning strategies is essential to ensure the functionality and safety of Brazilian transportation systems in the face of advancing climate change.

## REFERENCES

ABATZOGLOU, J. T.; DOBROWSKI, S. Z.; PARKS, S. A.; HEGEWISCH, K. C. **TerraClimate, a high-resolution global dataset of monthly climate and climatic water balance from 1958–2015**. Scientific Data, [S.l.], v. 5, p. 170191, 2018. DOI: https://doi.org/10.1038/sdata.2017.191.

ADAPTA BRASIL MCTI. Available at: https://adaptabrasil.mcti.gov.br/, Accessed on July 29, 2025.

ANTAQ – National Waterway Transportation Agency. **Waterway Statistics: load by hydrographic region, waterway and river – Database**. Available at: https://web3.antaq.gov.br/ea/sense/download.html. Accessed on: 301 jul. 2025.

ASHOURI, H. et al. PERSIANN-CDR: **Daily precipitation climate data record from multisatellite observations for hydrological and climate studies**. Bulletin of the American Meteorological Society, [S.l.], v. 96, n. 1, p. 69–83, 2015. DOI: https://doi.org/10.1175/BAMS-D-13-00068.1.

CNT, C. N. dos T. Aspectos gerais da navegação inland no Brasil. 1. ed. Brasília: s. n., 2019. v. 01.

CEMADEN, 2024. Available at: https://www.gov.br/cemaden/pt-br/assuntos/monitoramento/boletim-de-impactos. Accessed on July 30, 2025.

CUNHA, A.P.M.A., BUERMANN, W.; MARENGO, J.A. **Changes in compound drought-heat events over Brazil's Pantanal wetland: an assessment using remote sensing data and multiple drought indicators**. ClimDyn 62, 739–757 (2024). https://doi.org/10.1007/s00382-023-06937-x

CUNHA, H., C.; OLIVEIRA, R., F. **Design of a Flexible Pavement Between the Municipalities of Monte Carmelo and Abadia dos Dourados**. GeTeC Magazine, v. 10, n. 26, 2021.

FREITAS JÚNIOR, M. *et al*. **Waterway transport, a study of Brazilian waterways and their main characteristics**. Observatório de laEconomíaLatinoamericana, Curitiba, v. 22, n. 1, p. 26422664, 2024. DOI: 10.55905/oelv22n1-137

FUNK, C. *et al*. **The climate hazards infrared precipitation with stations—a new environmental record for monitoring extremes**. Scientific Data, [S.l.], v. 2, p. 150066, 2015. DOI: https://doi.org/10.1038/sdata.2015.66.

HARRIS, I. *et al*. **Version 4 of the CRU TS monthly high-resolution gridded multivariate climate dataset**. Scientific

Data, [S.l.], v. 7, p. 109, 2020. DOI: https://doi.org/10.1038/s41597-020-0453-3.

HERSBACH, H. *et al.* ERA5: **Fifth generation of ECMWF atmospheric reanalyses of the global climate**. CopernicusClimateChange Service (C3S) Climate Data Store, 2023. Available at: https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/reanalysis-era5-single-levels-monthly-means. Accessed on: 29 jul. 2025.

NIGGLI, L.; HUGGEL C.; MUCCIONE V.; NEUKOM, R.; SALZMANN, N. (2022) **Towards a better understanding of cascading and interconnected risks of simultaneous climate extremes : Analysis of historical heat and drought events**. PLOS Clim 1(8): e0000057. https://doi.org/10.1371/journal.pclm.0000057

NJOGU, H. W. (2022). **Effects of droughts on the delivery of infrastructure services in Kenya. Natural Resources Forum**, 46(2), 221-244. https://doi.org/10.1111/1477-8947.12251

NUNES, P. B. S.; CUNTO, F. J.C.; MARQUES, S.F. Esti**mation of the volume of traffic at intersections of Fortaleza based on universal kriging**. In: CONGRESSO DE PESQUISA E ENSINO EM TRANSPORTES – ANPET, 37., 2023, Santos-SP. Annals... Santos: ANPET, 2023.

PAIVA, V.; RUSSO, M. R.A. **Identification of a road stretch with a high accident rate and proposal of solutions – case study**. In: NATIONAL ROAD CONSERVATION MEETING (ENACOR), 26.; ANNUAL PAVING MEETING (RAPv), 49., 2024, Aracaju. Annals... Aracaju: DNIT/ABPv, 2024. DOI: 10.29327/1430212.49-85.

SEITZ, Z. **From Floods to Heatwaves: Strengthening Urban Transport amidst Changing Climate – Experiences from China on Climate-Proofing Urban Mobility Systems**. Bonn/Eschborn: Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH, 2025. Disponível em: https://changing-transport.org/wp-content/uploads/2025_From-floods-to-heatwaves_Stregthening-Urban-Transport.pdf. Accessed on: 23 jul. 2025.

SILVA, K.C.R.; FERRAZ, A.C.P. **Transferability and application of the HSM accident prediction model for single-lane highway segments. Annals of the 35th Congress of Research and Teaching in Transport** – ANPET, Online, 2020.

SIMPSON N.P.; *et al*. **A framework for complex climate change risk assessment**. One Earth. 2021.

SMITH, K.; *et al*. **Baseline Assessment of Drought Impact Monitoring; Integrated Drought Management Programme (IDMP), Integrated Drought Management Tools and Guidelines Series 3**; World Meteorological Organization (WMO) and Integrated Drought Management Programme (IDMP): Geneva, 2025.

UNITED NATIONS CONVENTION TO COMBAT DESERTIFICATION (UNCCD). **Drought in Numbers 2022**; UNCCD, 2022. https://www.unccd.int/sites/default/files/2022-06/Drought%20in%20Numbers%20%28English%29.pdf.

UNITED NATIONS OFFICE FOR DISASTER RISK REDUCTION (UNDRR)(2021). **GAR Special Report on Drought 2021**. Geneva.

UNITED STATES. NATIONAL INTEGRATED DROUGHT INFORMATION SYSTEM (NIDIS). **Drought Impacts on Navigation and Transportation**. Washington, D.C.: U.S. Drought Portal, [2023?]. Disponível em: https://www.drought.gov/sectors/navigation-and-transportation. Accessed on: 23 jul. 2025.

VICENTE-SERRANO, S.M.; BEGUERÍA, S.; LÓPEZ-MORENO, J.I. **A multiscalar drought index sensitive to global warming: The Standardized Precipitation Evapotranspiration Index**. Journal of Climate, v. 23, p. 1696–1718, 2010. DOI: 10.1175/2009JCLI2909.1.

VOGEL MM *et al*. (2019). **Concurrent 2018 Hot Extremes Across Northern Hemisphere Due to Human-Induced Climate Change**. Earth's Future. 2019; 7(7):692–703. pmid:31598535

WHO. (2021). Drought Overview. WHO website. https://www.who.int/health-topics/drought#

WILHITE, Donald A.; GLANTZ, Michael H. **Understanding the drought phenomenon: the role of definitions**. Water International, v. 10, n. 3, p. 111–120, 1987.

WMO – WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION. **Drought. Geneva: WMO, 2020**. Available at: https://wmo.int/about-us/world-meteorological-day/wmd-2020/drought. Accessed on: 29 jul. 2025.

WMO. (2021). **WMO Atlas of Mortality and Economic Losses from Weather, Climate and Water Extremes 1970–2019**. https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=10902

ZSCHEISCHLER J. *et al.* (2020) **A typology of compound weather and climate events**. Nat Rev Earth Environ 1(7):333–347. https:// doi.org/10.1038/s43017-020-0060-z

ZUO, J. *et al.* **Impacts of heatwaves and corresponding measures: a review**. J Clean Prod [Internet]. 2015; 92:1–12. Available at: http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.12.078 Accessed on: 29 Jul.2025.

6

# INFRAESTRUTURA URBANA E A DUPLA AMEAÇA HÍDRICA: VULNERABILIDADE À EROSÃO COSTEIRA E ALAGAMENTOS PLUVIAIS EM NATAL(RN)

VENERANDO EUSTÁQUIO AMARO,
SARAH DE ANDRADE E ANDRADE
E GABRIEL DALLA ROSA CARVALHO

## RESUMO

A infraestrutura urbana de Natal (RN) enfrenta uma vulnerabilidade sistêmica, produto de uma dupla e sinérgica ameaça hídrica: a erosão costeira crônica e os alagamentos pluviais. Essa condição não se configura como mero subproduto da crise climática, mas sim como o resultado de um modelo de desenvolvimento que persistentemente negligência as dinâmicas naturais, culminando em um cenário de risco ativamente construído. As respostas históricas, baseadas em infraestruturas rígidas e em um sistema de drenagem deficiente, configuraram um ciclo de má adaptação, exacerbando os riscos e gerando falências em cascata. O paradoxo se aprofunda com o novo Plano Diretor de Natal que adota, ao mesmo tempo, um discurso de resiliência e promove o adensamento em áreas vulneráveis. Conclui-se que, para além dos desafios técnicos, um obstáculo central à resiliência reside na crise de governança urbana, o que exige uma ruptura paradigmática em direção a um planejamento integrado e adaptativo.

### Palavras-chave

Vulnerabilidade Costeira; Governança Climática; Riscos Socioambientais.

# 1. INTRODUÇÃO

As mudanças climáticas globais, impulsionadas por forçantes antropogênicas, estão alterando fundamentalmente o balanço energético do sistema terrestre. Esse processo é evidenciado pelo crescente desequilíbrio energético da Terra, que se manifesta primariamente no aquecimento dos oceanos, que funcionam como o principal reservatório de calor do planeta, absorvendo aproximadamente 93% da energia excedente acumulada no sistema climático desde 1955 (Levitus *et al.*, 2012). A aceleração do aquecimento da superfície do mar, impulsionada pelo desequilíbrio energético da Terra, evidencia uma tendência de intensificação. A taxa de aquecimento elevou-se de 0,06 K década-1, no período de 1985–1989, para 0,27 K década-1, entre 2019–2023. É fundamental esclarecer que a unidade *Kelvin por década*$^{-1}$ (K década$^{-1}$) é utilizada para expressar a taxa de variação da temperatura em um período de dez anos, sendo uma métrica frequentemente empregada em estudos de climatologia e mudanças climáticas para descrever a tendência de aquecimento ou resfriamento ao longo do tempo (Schwartz, 2007). Ademais, essa variação em Kelvin (ΔK) é numericamente idêntica à variação em graus Celsius (Δ°C). Essa progressão projeta que o aquecimento acumulado de 0,53 K nos últimos 40 anos será provavelmente excedido nas próximas duas décadas (Merchant *et al.*, 2025).

O armazenamento de calor nos oceanos — com um aumento de $24{,}0\times10^{22}$ Joules na camada de 0-2000 m entre 1955 e 2010 — acarreta duas consequências diretas e interligadas: a expansão térmica da coluna d'água e a intensificação do ciclo hidrológico (Levitus *et al.*, 2012). A expansão térmica é a principal componente da elevação global do Nível Médio do Mar (NMM), respondendo por 56% da taxa de subida total (Liang *et al.*, 2025), somado ao derretimento de geleiras e mantos de gelo. Medições por satélites altímetros, iniciadas em 1993, revelam que a taxa de elevação mais do que dobrou: passou de 2,1 mm/ano, no período de 1993 a 2002, para 4,7 mm/ano, na última década (WMO, 2025). No acumulado desde 1993, o NMM já subiu aproximadamente 10 cm e

sua contínua aceleração, evidencia que tendências passadas são insuficientes para projetar os impactos futuros, exigindo revisões constantes dos modelos de risco e adaptação costeira aos impactos (NASA, 2025).

Concomitantemente, o acúmulo de energia no sistema oceânico transfere mais energia para a atmosfera, o que intensifica o fluxo energético do clima de ondas. Esse processo inclui o aumento do Poder Global das Ondas (PGO), que é a medida do transporte da energia cinética e potencial transferidas do vento para o movimento da superfície do mar, que, igualmente, representa o potencial para geração de eletricidade em escala global. Análises de longo prazo indicam que o PGO tem exibido tendência de crescimento, com uma taxa de aumento de 0,47% ao ano entre 1948 e 2008, o que está estatisticamente relacionado ao aquecimento da superfície do mar. Essa tendência é consistente com estudos mais recentes, que confirmam o aumento do PGO como consequência das mudanças climáticas globais e da intensificação das principais oscilações climáticas globais, que modulam a circulação atmosférica e a energia das ondas (Reguero *et al.*, 2019; Liu *et al.*, 2024).

Na região do Atlântico Equatorial Sul, que banha a costa do Nordeste do Brasil, a realidade climática global interage com um complexo conjunto de sistemas meteorológicos que modulam a dinâmica de precipitação local. A Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) configura-se como o principal modulador em larga escala do regime pluviométrico anual, cuja migração latitudinal sazonal determina os períodos chuvosos e secos na região (Molion; Bernardo, 2002). Concomitantemente, a área é influenciada pelos Distúrbios Ondulatórios de Leste (DOL). Estes são sistemas sinóticos de mesoescala que se propagam nos ventos alísios do Oceano Atlântico em direção à costa (Torres; Ferreira, 2011), e são reconhecidos como mecanismos críticos na deflagração da maioria dos Eventos Extremos de Precipitação (EEP). Tal interação, alimentada pela intensa convergência de umidade decorrente das temperaturas oceânicas mais quentes, potencializa a ocorrência de eventos extremos, capazes de gerar acumulados de precipitação superiores a 200 mm em 24 horas (Espinoza

*et al.*, 2021; Costa *et al.*, 2022). A atuação desses distúrbios está, por sua vez, diretamente associada à ocorrência de inundações e desastres em áreas urbanas costeiras de Natal, intensificando a vulnerabilidade da infraestrutura aos riscos pluviais e geológicos (Ribeiro *et al.*, 2021).

O resultado é uma dupla e sinérgica ameaça hídrica para as zonas costeiras: de um lado, um processo crônico de erosão costeira, intensificado pelo NMM mais elevado e por um clima de ondas mais energético; de outro, recorrentes alagamentos e inundações, deflagrados pelos EEP que, na região, exibem tendência de intensificação nas últimas décadas.

Nesse contexto, a cidade de Natal, capital do estado do Rio Grande do Norte (RN), emerge como um caso de estudo emblemático sobre a alta vulnerabilidade das cidades costeiras no Nordeste brasileiro aos impactos das mudanças climáticas e as soluções de adaptação. Sua identidade socioeconômica, ancorada na atividade turística, cujos principais ativos são ícones paisagísticos, como o Morro do Careca e a Praia de Ponta Negra, está intrinsecamente acoplada à estabilidade de sua orla marítima. O cerne da problemática local reside no modelo de desenvolvimento urbano, aprofundado a partir da década de 1980, caracterizado por uma expansão acelerada da ocupação do solo, em conflito com as dinâmicas morfossedimentares e hidrológicas costeiras. Esse processo resultou na supressão de áreas vegetadas, campos de dunas e faixas de pós-praia, acompanhada da impermeabilização extensiva de bacias de drenagem e na ocupação de áreas de alta vulnerabilidade física e ambiental (Amaro *et al.*, 2015; 2021; Câmara, 2023).

Consequentemente, os sistemas urbanos e ambientais de Natal — abrangendo edificações, sistemas viários, saneamento e energia — foram, em grande parte, projetados com base em parâmetros climáticos estacionários. Tal premissa os torna sistemicamente vulneráveis à nova dinâmica imposta pela crise climática, exigindo uma transição paradigmática: do modelo de gestão reativo e emergencial para um planejamento proativo, integrado e adaptativo.

## 2. A DUPLA AMEAÇA CLIMÁTICA EM NATAL

### 2.1. A dinâmica da erosão costeira no litoral de Natal: urbanização, obras rígidas e a aceleração do risco

O processo erosivo no litoral do município de Natal é um fenômeno complexo, impulsionado pela interação de fatores multiescalares. Em escala global, o fenômeno é exacerbado por mudanças climáticas, manifestadas pela elevação do NMM e pelo crescimento global no fluxo de energia das ondas (Reguero *et al.*, 2019). Localmente, na faixa costeira de Ponta Negra e Via Costeira, o fluxo médio de energia incidente das ondas representa um clima de ondas com alturas significativas. Esse parâmetro – que é a média do terço mais alto das ondas – é fundamental para analisar os impactos da energia de ondas, como o potencial de erosão e os danos às estruturas costeiras. Observa-se a variação da categoria "moderadas" (alturas de 1,52m) a muito energéticas (alturas > que 2,36m), o que justifica a intensa dinâmica sedimentar e os riscos associados à erosão costeira na área (Almeida *et al.*, 2015; Pinheiro, 2023).

O cenário é intensificado por um conjunto de fatores antrópicos decorrentes do processo de urbanização da porção sul da orla marítima a partir da década de 1980. Destaca-se o papel do Projeto Parque das Dunas -Via Costeira, que combinou a criação da primeira Unidade de Conservação (UC) do estado (1977) — o Parque Estadual Dunas do Natal "Jornalista Luiz Maria Alves" —, com a construção de uma via expressa (RN-301) que conectou a praia e o bairro de Ponta Negra à orla central do município, de ocupação já consolidada.

Inaugurada em 1981, a construção da Via Costeira marca a inserção do município de Natal na "rota dos megaprojetos" para expansão do turismo, buscando a atração de investimentos nacionais e internacionais (estes últimos concretizados, sobretudo, a partir dos anos 2000) por meio do ordenamento da orla marítima. Esse processo culminou na fixação da linha de costa por meio de obras de engenharia rígidas, para proteção da infraestrutura pública e privada, e na supressão da vegetação dunar — interrompendo o

balanço sedimentar natural do sistema praia-duna e gerando um déficit crônico de sedimentos. Adicionalmente, o sistema de drenagem pluvial, com múltiplos pontos de descarga direta sobre a linha de costa e a face praial, alterou drasticamente a morfodinâmica costeira e agravou a perda de sedimentos (Amaro *et al.*, 2015). Como resultado, a combinação desses fatores estabeleceu a alta vulnerabilidade física e ambiental da orla de Natal aos crescentes impactos das mudanças climáticas (Amaro *et al.*, 2015; Tetra Tech, 2022; Câmara, 2023).

A análise multitemporal da evolução da linha de praia ao longo de Ponta Negra e da Via Costeira evidencia a aceleração do processo erosivo ao longo das últimas cinco décadas. No período de 1973 a 1986, anterior à urbanização intensiva, a praia exibia um balanço sedimentar relativamente estável: taxa média de recuo da linha de praia de -3,7 m/ano junto ao Morro do Careca, compensada por uma deposição sedimentar de 4,2 m/ano nos setores ao norte, na direção da Via Costeira (Amaro *et al.*, 2015). Contudo, após a consolidação da ocupação da orla marítima, a tendência erosiva se generalizou, passando a uma taxa média de erosão de -1,5 m/ano entre 1986 e 2012 (Amaro *et al.*, 2015).

O processo erosivo intensificou-se notavelmente na década de 2008 a 2018, expandindo-se para as áreas ao norte, que antes se encontravam em equilíbrio (Matos *et al.*, 2022). Novas análises, baseadas em modelagem geoespacial de imagens multitemporais de satélites entre os anos de 1986 e 2022, especificamente das plataformas LANDSAT (programa da *National Aeronautics and Space Administration* - NASA) e SENTINEL-2 (programa da *European Space Agency* - ESA), corroboram esse cenário, apontando uma taxa de média de erosão de -0,63 m/ano para todo o setor, com destaque para o trecho próximo ao Morro do Careca, com valores de -0,84 m/ano (Figura 1). Outras análises com imagens de satélite do período entre 1992 e 2022, corroboram este cenário, indicando uma taxa de média de erosão de até -1,19 m/ano para a praia de Ponta Negra (Câmara, 2023).

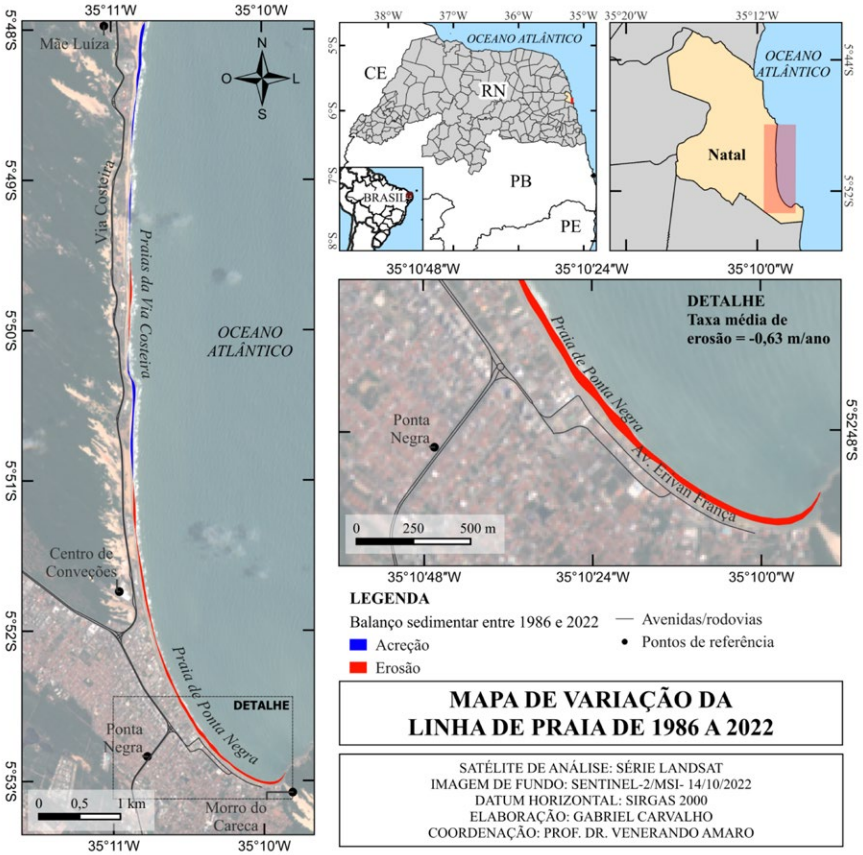



**Figura 1:** Análise da variação da linha de costa (1986-2022) nas praias de Ponta Negra e Via Costeira (Natal/RN), com destaque para o balanço sedimentar (setores de erosão e acreção) e as taxas de variação, obtidos a partir da modelagem geoespacial de uma série multitemporal de imagens do satélite LANDSAT. *Fonte: Elaborado pelos autores.*

Historicamente, a resposta para a estabilização da linha de costa nesse cenário dominantemente erosivo tem sido a implantação de soluções de engenharia rígida, como enrocamentos, muros de contenção e *betonbloc*. A adoção dessas estruturas foi impulsionada após 2012, quando a combinação de ondas altas, eventos extremos de precipitação e condições de preamar destruiu cerca de 2,5 km do calçadão à beira-mar da praia de Ponta Negra, como indica a Figura 2A (Amaro *et al.*, 2012; 2015). Contudo, tais inter-

venções, implantadas de forma reativa e sem a devida análise das forçantes hidrodinâmicas, intensificaram a erosão costeira (Figura 2B, 2C e 2D), configurando um caso emblemático de má adaptação da infraestrutura de proteção aos impactos das mudanças climáticas (Câmara, 2023). No período entre 2016 e 2022, subsequente à instalação das infraestruturas, as taxas de recuo da linha de praia alcançaram até -3,75 m/ano e um recuo líquido de -31 m, o equivalente a uma taxa média de erosão superior a -5,1 m/ano em alguns trechos (Câmara, 2023).

**Figura 2:** (A) Cenário da Praia de Ponta Negra em 2012, após a destruição da infraestrutura instalada na beira-mar; (B) Obra de enrocamento com blocos de rochas para proteção do talude; (C) Em trechos das praias de Ponta Negra e da Via Costeira, os níveis de preamar atingem recorrentemente a base das estruturas de contenção; (D) Processo erosivo deflagrado pelo muro de contenção de *betonblock*, com dissipador de energia instalado. *Fonte: Registros fotográficos realizados pelos autores.*

As intervenções de engenharia rígida, implantadas de forma reativa, exacerbaram a erosão costeira ao aumentar a reflexão da energia das ondas, o que provocou o aprofundamento do perfil praial na base das estruturas e a migração lateral do processo erosivo (Amaro *et al.*, 2015; Câmara, 2023). Esse quadro de instabilidade é agravado pelo aumento progressivo do NMM e do fluxo energético do clima de ondas. Eventos extremos, com ondas superiores a 2,65 m, são esperados a cada dois anos, ameaçando a integridade das defesas costeiras e da zona urbana na orla (Pinheiro *et al.*, 2023). Portanto, a alta vulnerabilidade atual decorre da interação sinérgica entre um déficit sedimentar inicial, soluções de engenharia mal adaptadas e a progressiva intensificação das forçantes climáticas.

## 2.2. Os eventos extremos de precipitação e a falência da drenagem urbana

A cidade de Natal enfrenta uma dupla e severa vulnerabilidade hídrica. O risco reside não apenas na intensificação das forçantes oceânicas, como o clima de ondas e as correntes, mas estende-se à vulnerabilidade pluvial. Esta se manifesta pelo agravamento dos EEP, constatado nas análises climatológicas das últimas três décadas, um fenômeno impulsionado pela atuação da ZCIT e do DOL em interação com a dinâmica de múltiplos sistemas sinóticos de mesoescala que afetam o litoral (Torres; Ferreira, 2011; Amorim *et al.*, 2019).

Embora a frequência não tenha apresentado alteração significativa, a intensidade média dos EEP elevou-se de 95,7 mm para 111,5 mm, com o limiar para um evento extremo diário (percentil 98) estabelecido em aproximadamente 70 mm (Amorim *et a*l., 2019). Tais eventos, dos quais 75% se concentram na estação chuvosa de abril a julho, podem apresentar acumulados de 60 mm em apenas três horas e totais diários que excedem 100 mm, sendo capazes de deflagrar alagamentos e até movimentos gravitacionais de massa de grande magnitude, como o desastre ocorrido em junho de 2014 no bairro de Mãe Luiza (Ribeiro *et al.*, 2021). Essa nova realidade

climática excede a capacidade de um sistema de drenagem historicamente projetado para um cenário de menor adensamento, baseado em lagoas de captação e no lançamento direto das águas pluviais nos corpos d'água e na linha de costa (Amaro *et al.*, 2015).

O risco de alagamento é potencializado pela massiva e crescente impermeabilização do solo, fruto da expansão urbana sobre uma geomorfologia complexa de dunas e planícies fluviais, que também acelera o escoamento superficial em direção às depressões topográficas (baixios), potencializando a ocorrência de enxurradas em vias e calçadas pavimentadas de baixa permeabilidade (Lima, 2019; Lima *et al.*, 2019; Eduardo, 2022). As deficiências no sistema de infraestrutura e nos serviços urbanos em Natal decorrem tanto de falhas em sua concepção original quanto de déficits na conservação da rede, fatos evidentes em seus bairros mais consolidados (Figura 3).

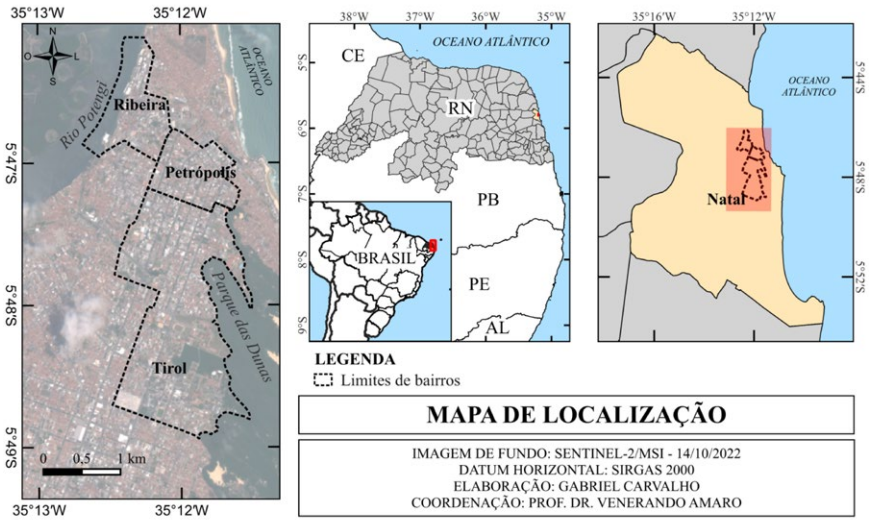



**Figura 3:** Localização dos bairros consolidados de Tirol, Petrópolis e Ribeira (Natal/RN), setores de estudo que apresentam alta vulnerabilidade a alagamentos. *Fonte: Elaborado pelos autores.*

Em bairros como Tirol, o sistema de drenagem pluvial alcança alta cobertura — de 99%. Contudo, essa extensão não garante a funcionalidade necessária. O sistema demonstra ser profundamente subdimensionado, evidenciando uma defasagem crítica entre o volume de precipitação e a cota de alagamento registrada em depressões topográficas críticas (Lima, 2019), conforme ilustrado na Figura 4. Tal condição estabelece um risco elevado de inundações, mesmo em setores urbanos com infraestrutura aparentemente consolidada. Em outros, como Ribeira e Petrópolis (Figura 5), igualmente atendidos por sistema de drenagem, o problema é agravado pela manutenção precária, manifestada em bocas de lobo assoreadas, obstruídas por resíduos, dispositivos deteriorados e trechos com ausência de caixas de grelhas, tampas e ralos de concreto ou ferro fundido, o que anula sua funcionalidade, como evidencia a Figura 6 (Eduardo, 2022).

Análises revelam, ainda, falhas de projeto, como as galerias dispostas no sentido contrário aos fluxos superficiais topográficos, gerando sobrecarga no sistema, e dispositivos de captação do sistema de drenagem instalados acima do nível médio de escoamento e acúmulo das águas pluviais (Lima, 2019; Lima, *et al.* 2019b; Eduardo, 2022). Essa conjunção de fatores estabelece uma correlação direta entre as chuvas e os alagamentos severos, que são deflagrados mesmo por precipitações moderadas (*e.g.*, >20 mm/h; Lima *et al.*, 2019; Figura 4C), afetando eixos viários vitais e bairros inteiros por toda a cidade.

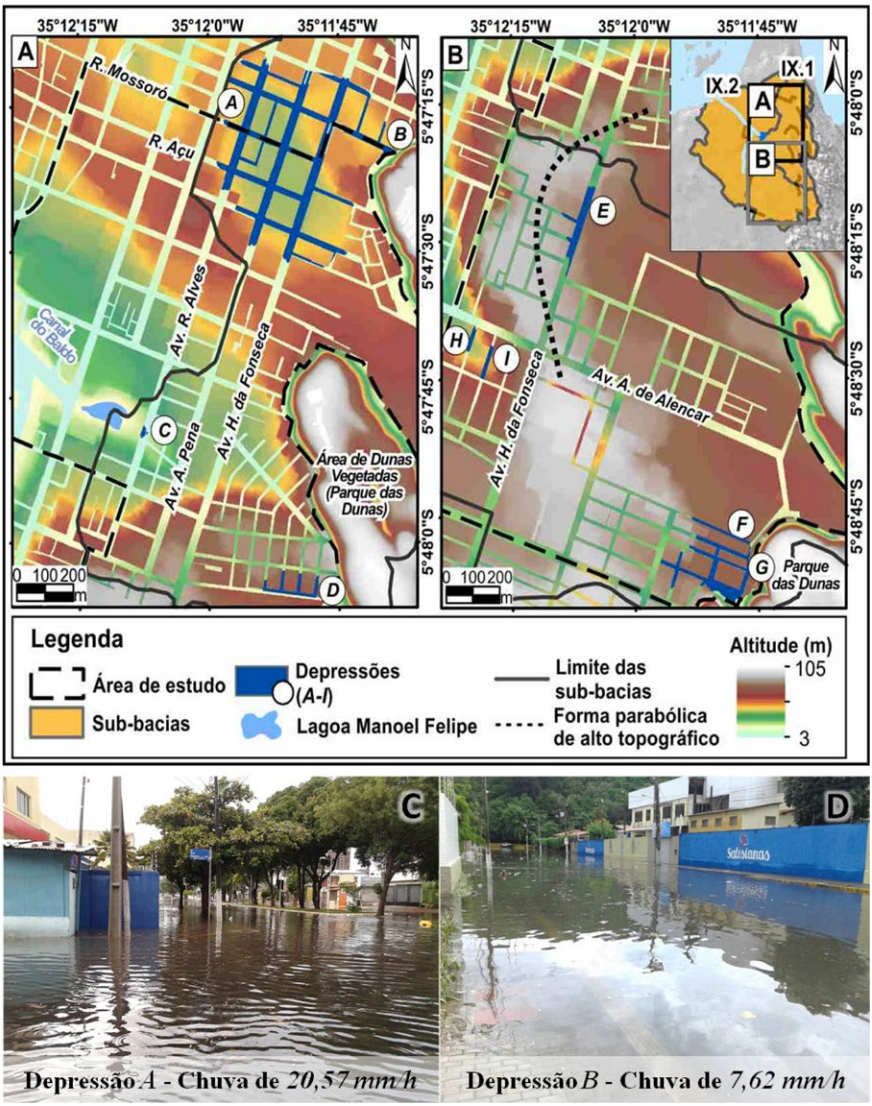



**Figura 4:** Localização das depressões topográficas identificadas no sistema de arruamentos e relacionadas à geomorfologia local e à disposição espacial das construções no bairro do Tirol: (A) Depressões *A*, *B*, *C* e *D* no setor nordeste; (B) Depressões *E*, *F*, *G*, *H* e *I* no setor sul; (C) Alagamento recorrente em via de acesso a hospitais e áreas comerciais; (D) Alagamento em frente à escola, clínicas médicas e residências. *Fonte: Adaptado pelos autores a partir de Lima (2019).*

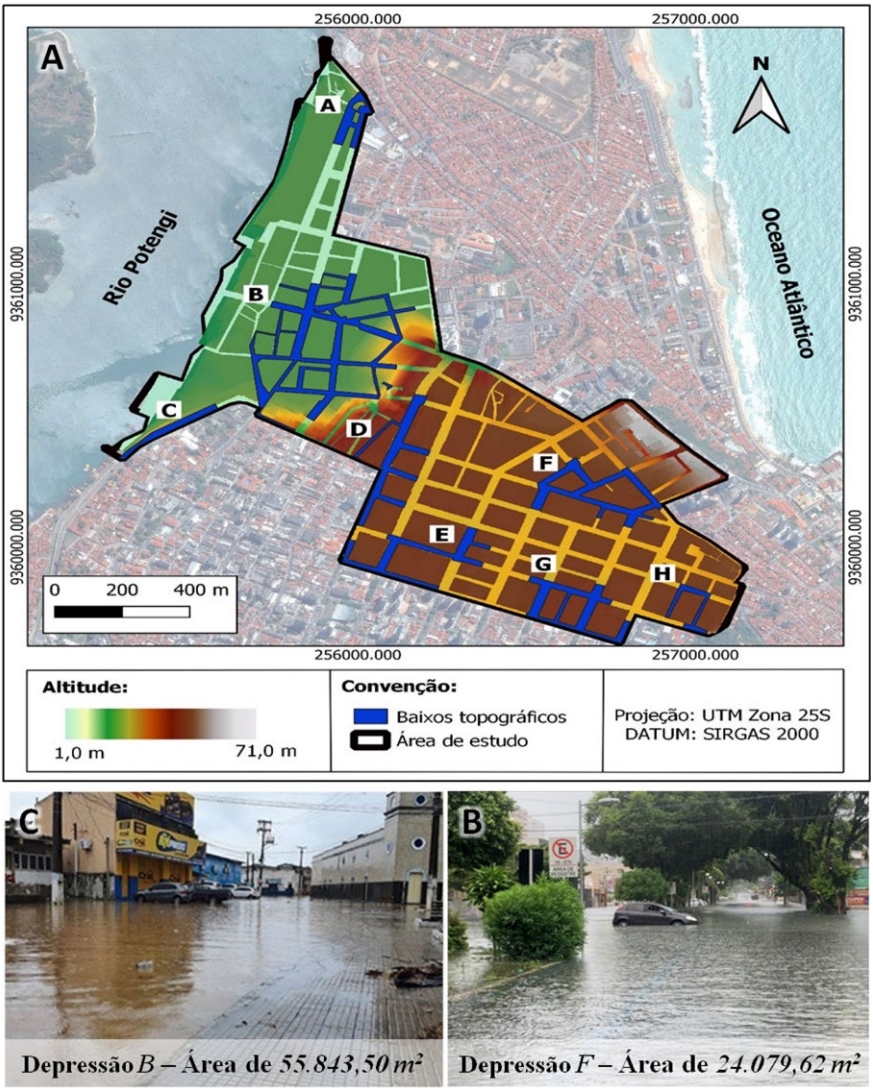



**Figura 5:** Localização das depressões topográficas identificadas no sistema de arruamentos e relacionadas à disposição espacial das construções nos bairros da Ribeira e Petrópolis: (A) Depressões *A*, *B*, *C* e *D* no bairro da Ribeira; (B) Depressões *E*, *F*, *G* e *H* no bairro Petrópolis; (C) Alagamento na principal via de acesso ao bairro da Ribeira e ao Porto de Natal; (D) Alagamento recorrente no bairro Petrópolis atingindo áreas comerciais e residências. *Fonte: Adaptado pelos autores a partir de Eduardo (2022).*

**Figura 6:** Exemplos de manutenção deficiente na rede de drenagem da Ribeira e Petrópolis, evidenciada pelo assoreamento, obstrução e deterioração de bocas de lobo. *Fonte: Registros fotográficos realizados pelos autores.*

## 3. AS VULNERABILIDADES DA INFRAESTRUTURA NATALENSE

### 3.1. O manejo das águas pluviais e a degradação do sistema de infraestrutura e serviços urbanos

O sistema de infraestrutura e serviços urbanos — que engloba as infraestruturas de drenagem, esgotamento e abastecimento de água, limpeza pública e manejo de resíduos sólidos, mobilidade e acessibilidade, energia e comunicações — são a espinha dorsal da funcionalidade urbana. Em Natal, a falência dessa infraestrutura durante os eventos de chuvas intensas é um sintoma crônico. O sistema de drenagem — subdimensionado — colapsa funcional-

mente, e a sobrecarga hídrica se estende à rede de esgotamento sanitário. Esta, não projetada para os volumes pluviais dos EEP, transborda em vias públicas, devido ao aumento de vazão causado por ligações clandestinas entre ambos os sistemas e pela deficiência na infiltração de água no solo saturado, fato tecnicamente reconhecido pela Companhia de Águas e Esgotos do Rio Grande do Norte (CAERN, 2023).

As consequências diretas incluem graves riscos à saúde pública e degradação da infraestrutura, como o solapamento do subleito viário que resulta em colapsos estruturais do pavimento (Figura 7A). Depressões topográficas em áreas críticas, como os cruzamentos de vias importantes, transformam-se em pontos de alagamento intransitáveis, mesmo com chuvas baixas a moderadas, comprometendo a trafegabilidade (Figura 7B; Lima *et al.*, 2019; Eduardo, 2022). Cria-se, assim, um ciclo de deterioração em que os alagamentos não apenas interrompem a mobilidade, mas, igualmente, danificam fisicamente os demais sistemas, comprometendo-os a longo prazo.

De forma ainda mais severa, a interconexão dos riscos pluviais e geotécnicos é catastrófica, devido ao predomínio de rochas areníticas e solos arenosos em morfologia de falésias recobertas por campos de dunas, que estão entre os fatores deflagradores do desastre de Mãe Luíza (Ribeiro *et al.*, 2021). Na ocasião, um movimento de massa de grande magnitude foi deflagrado por um evento extremo de precipitação, que acumulou aproximadamente 340 mm em 36 horas — o maior volume concentrado registrado na cidade nos últimos 50 anos. Esse desastre, que resultou na destruição de vias e edificações (Figura 7C e 7D), é tecnicamente atribuído à combinação do colapso hídrico do solo arenoso com a elevada vulnerabilidade geotécnica do local (CPRM, 2014). A situação foi drasticamente potencializada pelo descaso histórico da gestão pública, que permitiu a consolidação da ocupação em área de alto risco, associada à ausência de sistemas de drenagem pluvial e saneamento básico adequado. Tais omissões foram fatores que contribuíram diretamente para a saturação do solo por infiltração e consequente ruptura do talude por perda de coesão (Macedo *et al.*, 2015).

**Figura 7:** (A) Colapso estrutural do pavimento viário no bairro Petrópolis e afundamento de veículo por solapamento do subleito; (B) Falha do pavimento e queda de veículo por perda de trafegabilidade durante evento de alagamento; (C) Vista geral do movimento de massa no bairro de Mãe Luíza (junho de 2014); (D) Detalhe da destruição do sistema de infraestruturas e das edificações. *Fontes: Adaptado pelos autores a partir de: https://fiscalambiental.wordpress.com/; https://g1.globo.com/rn/; https://agorarn.com.br/.*

## 3.2. A erosão costeira e a ruptura do sistema de infraestrutura e serviços urbanos na orla

Nas praias de Natal, o déficit sedimentar intensifica a vulnerabilidade das infraestruturas costeiras, uma vez que amplia sua exposição à ação direta das forçantes hidrodinâmicas. O processo erosivo costeiro, ao suprimir a função dissipadora de energia do clima de ondas do perfil praial, intensifica a incidência do hidrodinamismo marinho diretamente sobre as estruturas de engenharia rígida. Atualmente, a base dessas obras de contenção já é frequentemente atingida pelo alcance indistinto das preamares,

indicando a perda da zona de amortecimento natural e o aumento do risco estrutural (Figura 2C). Essa conjuntura intensifica os danos às redes técnicas (e.g., sistemas de drenagem, esgotamento sanitário e cabeamento), tipicamente instaladas sob os aterros de vias e calçadões, culminando em sua ruptura e colapso. Um exemplo emblemático desse processo foi a destruição, em julho de 2012, de um segmento da avenida e do calçadão que margeiam a praia de Ponta Negra, o que ilustra o impacto direto da erosão costeira crônica e de ressacas sobre o patrimônio construído (Amaro *et al.*, 2015).

O principal mecanismo de colapso dessas estruturas de contenção rígidas é a erosão na base (*scour*), que compromete a sua fundação. A energia das ondas, ao colidir e ser refletida pela infraestrutura rígida (enrocamentos e muros), intensifica a remoção do sedimento que lhe confere suporte geotécnico, gerando recalques diferenciais e instabilidade (Schoonees *et al.*, 2019). Tal processo é evidenciado pelo deslocamento e rolamento dos blocos de rochas do enrocamento e dos módulos de concreto do *betonblock* para a face da praia e exposição dos dispositivos das redes técnicas (Câmara, 2023). Corroborando a análise, estudos documentam patologias estruturais severas nas infraestruturas da orla de Ponta Negra e na Via Costeira, o colapso de seções da rede de drenagem pluvial e o solapamento das fundações de muros de contenção. Tais danos são uma consequência direta da supressão do perfil praial pela erosão (Figura 8A), processo que elimina a barreira natural de dissipação da energia das ondas e expõe a infraestrutura urbana ao ataque direto do hidrodinamismo marinho (Tetra Tech, 2022; Câmara, 2023).

Adicionalmente, um fator antropogênico acelera a remoção de sedimentos e compromete a estabilidade da face praial: o modelo do sistema de manejo de águas pluviais de Natal que, historicamente, direciona o escoamento para múltiplos pontos de lançamento diretamente na linha de costa (Figura 8B, Amaro *et al.*, 2015). Esse fluxo concentrado possui energia suficiente para transportar ativamente os sedimentos da praia, funcionando como "sangradouros artificiais", que escavam canais e desestabilizam o

perfil praial, como mostra a Figura 8C (Alff, 2019; Câmara, 2023). Frequentemente, esse escoamento é contaminado por ligações clandestinas de esgoto, gerando o fenômeno conhecido como "língua negra", um efluente que, além de constituir um foco de incisão erosiva nas praias urbanas, representa um grave passivo ambiental e de saúde pública (Figura 8D).

**Figura 8:** Impactos diretos dos efeitos sinérgicos negativos da infraestrutura rígida (enrocamento, muro de contenção e betonblock) na erosão costeira e vice-versa: (A) supressão severa dos sedimentos no perfil de praia, que expõe as estruturas ao ataque das ondas; (B) Ponto de lançamento direto de águas pluviais na face de praia; (C) Atuação do fluxo de drenagem como um "sangradouro artificial", erodindo e desestabilizando o perfil da praia; (D) Descarga de efluente contaminado por esgoto ("língua negra"), constituindo um passivo ambiental e de saúde pública. *Fonte: Registros fotográficos realizados pelos autores.*

# 4. RUMO À RESILIÊNCIA: ESTRATÉGIAS DE ADAPTAÇÃO EM NATAL

## 4.1. Controvérsias na engorda artificial das praias de Ponta Negra e Via Costeira

O processo erosivo nas praias de Ponta Negra e da Via Costeira é um caso paradigmático dos desafios e equívocos na gestão costeira brasileira. Embora a engorda artificial (ou aterro hidráulico) de 2,5 km de orla fosse a solução técnica recomendada em Laudo Pericial desde 2012 (Amaro *et al.*, 2012), a década seguinte foi marcada por intervenções reativas que agravaram o problema. Implantaram-se estruturas de engenharia rígida (enrocamentos, muros de contenção e *betonblock*) que, somadas a um sistema de drenagem pluvial obsoleto, aceleraram a erosão costeira e expandiram o problema para os setores adjacentes na Via Costeira (Câmara, 2023). Tais ações configuram um claro processo de má adaptação da orla aos efeitos do aumento do NMM e do fluxo energético de ondas já estabelecidas, intensificando a vulnerabilidade do sistema e tornando a solução definitiva mais complexa, extensa e custosa.

A intervenção tardia executada no litoral sul de Natal, materializada pelo aterro hidráulico — uma técnica que consiste na dragagem de areia de jazidas submarinas e no seu bombeamento para a zona de pós-praia, com o objetivo de restaurar e alargar o perfil praial — foi executada entre agosto de 2024 e janeiro de 2025. O projeto, que se estende por 4,5 km na linha de costa e objetiva alargar a faixa de areia em até 100 m, alinha-se conceitualmente às modernas estratégias de adaptação e proteção costeira, sendo classificado como uma forma de engenharia costeira 'flexível' ou como uma Solução baseada na Natureza (SbN). Tais soluções são reconhecidas por promoverem a multifuncionalidade e buscarem mitigar os impactos da erosão, diferentemente das estruturas 'rígidas' (Tetra Tech, 2022; Van Der Meulen *et al.*, 2023; Geukes *et al.*, 2024). Contudo, a sustentabilidade da intervenção depende intrinsecamente de uma execução, manutenção e gestão rigorosas. No entanto, a obra foi iniciada sem a totalidade das licenças ambien-

tais e executada sem o suporte da fiscalização ambiental adequada, além de ter tido um cronograma acelerado, resultando em um perfil praial instável. Consequentemente, na perspectiva do meio físico, formaram-se escarpas de berma altas, íngremes, e o aterro tornou-se vulnerável ao escoamento de águas pluviais e esgoto, que erodem, alagam e contaminam os sedimentos recém-depositados (Tribuna do Norte, 2024).

Tais falhas geraram graves problemas sociais, como a dificuldade de acesso para banhistas e trabalhadores da orla; o aumento do risco de afogamentos, devido a novas correntes de retorno; e os prejuízos econômicos atrelados à redução do número de frequentadores da praia, que demonstram que a obra, ao invés de restaurar o bem-estar, tem gerado inseguranças. O caso ilustra o paradoxo crítico destacado por Saengsupavanich *et al.* (2023): projetos de engorda artificial, quando mal executados, degradam o ambiente costeiro e o tecido social, transformando-se em exemplos de má governança que postergam e amplificam a crise.

## 4.2. A (in)existência de uma governança climática em Natal

Em reconhecimento ao cenário de fragilidade até aqui delineado, o novo Plano Diretor de Natal (PDN) (Natal, 2022) considera as ações de mitigação e adaptação dos efeitos urbanos deletérios das mudanças climáticas, bem como a necessidade de promoção do equilíbrio climático, como diretrizes do planejamento urbano do município. Apesar de ser o primeiro a tratar, explicitamente, do enfrentamento às mudanças do clima, o novo PDN flexibiliza instrumentos de proteção ambiental e os parâmetros construtivos, contrariando seus objetivos e diretrizes. Na orla marítima, em que pese à extensa leitura e comprovação de sua fragilidade, tem-se um conjunto de prescrições que ignoram o papel social, biológico e os serviços ecossistêmicos desempenhados pela qualificação do uso do solo e sua respectiva infraestrutura. Ao invés de restringir a ocupação em áreas de alta vulnerabilidade à erosão e a alagamentos, por exemplo, o PDN e suas legislações derivadas, definem (Quadro 1):

**Quadro 1:** Principais prescrições urbanísticas para a orla de Ponta Negra e Via Costeira e suas alterações a partir do novo Plano Diretor de Natal

| INSTRUMENTOS E PARÂMETROS | TERRITÓRIO | PRESCRIÇÕES | | CONSEQUÊNCIAS | ALTERNATIVAS |
|---|---|---|---|---|---|
| | | PDN 2007 Legislações Correlatas | PDN 2022 Legislações Correlatas | | |
| **ZONEAMENTO** | Ponta Negra e Via Costeira | Zona Especial de Interesse Turístico e Paisagístico | Área Especial de Interesse Turístico e Paisagístico | Ajuste formal | - |
| **ZONEAMENTO - ÁREA NON AEDIFICANDI (ANA)** | Ponta Negra | Segue Decreto municipal 2.236/1979 | Extinta | Mais área construída e impermeável, supressão de vegetação, aumento temperatura superficial | Implantação de parque linear |
| **CONTROLE DE GABARITO** | Ponta Negra | 7,5 m de qualquer ponto do terreno | 7,5m a partir da cota mais alta do meio fio | Maior obstrução da paisagem, tendência de ampliação da ocupação | Manutenção do parâmetro de medição para menor impacto paisagístico |
| | Entorno do Parque das Dunas[1] (unidade de conservação estadual) | Escalonamento do controle de gabarito: 7,5m; 12m; 15m; 30m; e até 100m | Extinta | Efeito de borda | Manutenção do controle de gabarito / zona de amortecimento |
| | Via Costeira | Limitado à altura da Avenida ou até 7,5m onde há obstrução da paisagem | 15m a partir da Avenida | Incentivo à construção e impermeabilização, aumento da temperatura superficial, incremento da erosão | Implantação de parques e equipamentos de uso coletivo e infraestrutura verde |
| **USO DO SOLO** | Ponta Negra | Uso misto | | Manutenção das condições de uso do solo | Desincentivo à ocupação na linha de costa, implantação de equipamentos de uso público e infraestrutura verde |
| | Via Costeira | Equipamentos de apoio às atividades turísticas e institucional | Adiciona-se o uso residencial multipropriedade | Mais área construída e impermeável, aumento temperatura superficial, tendência à privatização do espaço | |
| **COEFICIENTE DE APROVEITAMENTO** | Ponta Negra | 1,0 e 1,2 | 3,5, podendo chegar a 5,0 | Incentivo à construção e impermeabilização, aumento da temperatura superficial, incremento da erosão, sobrecarga da infraestrutura | Manutenção dos baixos índices de ocupação, fomento à retirada de infraestruturas rígidas da linha de costa |
| | Via Costeira | 0,2 e 1,0 | | | |

1 Unidade de Conservação Estadual.

| INSTRUMENTOS E PARÂMETROS | TERRITÓRIO | PRESCRIÇÕES | | CONSEQUÊNCIAS | ALTERNATIVAS |
|---|---|---|---|---|---|
| | | PDN 2007 Legislações Correlatas | PDN 2022 Legislações Correlatas | | |
| **TAXA DE IMPERMEABILIZAÇÃO** | Ponta Negra | Até 80% | Até 90% | Menor superfície de infiltração e retenção de águas pluviais | Diminuição da taxa de impermeabilização, recomendação de uso de pavimentos drenantes e *SBN*s |
| | Via Costeira | 25% a 40% | | | |
| **MECANISMOS DE ESTABILIDADE DA LINHA DE COSTA** | Ponta Negra e Via Costeira | Inexistente | Projeto individualmente licenciado, com soluções já, existentes (enrocamento modular); | Importante constar, mas reforça as soluções individualizadas e a rigidez na linha de costa | Desincentivo à ocupação na linha de costa, implantação de equipamentos de uso público e infraestrutura verde |

*Fonte: Sistematização dos autores (2025) a partir de Natal (2007; 2022; 2024)*

Esse contrassenso — verificado na medida em que o PDN, ao mesmo tempo, reconhece os riscos à ocupação em áreas suscetíveis à erosão costeira, movimentos de massa, alagamentos e inundação, e os libera para adensamento — revela um discurso em prol da resiliência urbana e a inexistência de uma governança climática, na prática (Ataíde *et al.*, 2024). Essa resiliência deve envolver uma articulação complexa entre a sociedade civil e o poder público, aqui especialmente representado pela Defesa Civil, Secretaria de Meio Ambiente e Urbanismo (SEMURB) e Instituto de Desenvolvimento Sustentável e Meio Ambiente do Rio Grande do Norte (IDEMA), cujas ações de monitoramento, licenciamento e fiscalização são cruciais para evitar a criação de novos riscos.

## 5. CONCLUSÃO

A análise da vulnerabilidade de Natal à luz das estratégias de enfrentamento dos impactos da crise climática revela uma dupla e sinérgica ameaça hídrica: de um lado, a erosão costeira crônica; de outro, os alagamentos recorrentes deflagrados por eventos extremos de precipitação. A criticidade do cenário atual decorre da interação entre ambos os processos, sendo a vulnerabilidade não um mero subproduto da crise climática global, mas uma condição ativamente construída e potencializada por um modelo de desenvol-

vimento urbano que, por décadas, negligenciou as dinâmicas dos sistemas naturais.

A erosão costeira manifesta-se como resultante de uma complexa interação entre a pressão de uso e ocupação sobre um substrato geológico-geomorfológico vulnerável, a implantação de soluções de engenharia reativas — baseadas em infraestruturas rígidas e notadamente mal adaptadas — e a intensificação das forçantes hidrodinâmicas e climáticas. Nesse quadro, o sistema de manejo das águas pluviais, subdimensionado e com manutenção deficiente, atua como um vetor de risco duplo: falha em escoar os volumes pluviais, gerando alagamentos severos, e simultaneamente funciona como agente erosivo ao lançar fluxos concentrados diretamente na praia, desestabilizando-a e contaminando-a com efluentes de esgotos domésticos. A falência das infraestruturas, portanto, gera um efeito cascata que compromete a resiliência e a funcionalidade de todo o ecossistema costeiro, desde a mobilidade e o saneamento até a estabilidade geotécnica de áreas de risco.

O paradoxo da resiliência em Natal se manifesta de forma contundente nas intervenções recentes. O projeto da engorda artificial das praias de Ponta Negra e de trecho da Via Costeira, embora conceitualmente alinhado às SbN, teve sua eficácia comprometida por uma execução acelerada e por falhas de governança, gerando novos riscos físicos e sociais e transformando-o em um potencial caso de má adaptação.

Agravando esse panorama, o modelo de cidade proposto pelo PDN ratifica e prolonga o atual cenário de vulnerabilidade. Apesar de reconhecer discursivamente a ameaça climática, o instrumento flexibiliza o adensamento e a verticalização da orla, consolidando as práticas de enrijecimento da linha de costa — como artifício protetivo — e a impermeabilização do solo. Tal dissonância entre o discurso da sustentabilidade e a prática do planejamento perpetua um modelo de desenvolvimento em conflito com a necessidade de adaptação à crise climática, amplificando os riscos. Essa abordagem, fundamentada no paradigma obsoleto da "infraestrutura cinza", ocorre em detrimento do potencial subexplorado da infraestrutura verde — como parques inundáveis, jardins de chuva

e pavimentos permeáveis —, que permanece como um vetor de inovação largamente inexplorado no planejamento da cidade.

Esse cenário impõe a urgência de uma reavaliação da governança climática local, em seus distintos contextos territoriais e institucionais. Longe de ser um debate novo, sua pertinência se renova e demanda a superação de práticas de planejamento convencionais, exigindo a construção de respostas articuladas entre governos e sociedade civil. O objetivo último é alcançar um equilíbrio dinâmico e resiliente que reintegre as lógicas dos sistemas naturais — geológico, hidrológico e biológico — aos sistemas antrópicos — social, circulatório e metabólico (Janot, 2013), garantindo um futuro mais seguro e sustentável para as cidades costeiras diante dos desafios da crise climática.

## REFERÊNCIAS


ALFF, R. M. L. **Análise crítica de obras civis: um estudo de caso da praia de Ponta Negra, Natal-RN**. 2019. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2019.

ALMEIDA, L. R. *et al.* **Avaliação do clima de ondas da praia de Ponta Negra (RN, Brasil) através do uso do SMC-Brasil e sua contribuição à gestão costeira**. Revista da Gestão Costeira Integrada, [S. l.], v. 15, p. 135-151, 2015. DOI: 10.5894/rgci532.

AMARO, V. E. *et al.* **Laudo Pericial – Item B: Indicação das obras emergenciais de contenção e reparação dos equipamentos públicos e de segurança dos frequentadores da Praia de Ponta Negra**. Natal, RN: [s. n.], 2012. 254 f.

AMARO, V. E. *et al.* **Analysis of physical vulnerability indices using geotechnologies in the Barreira do Inferno region of Rio Grande do Norte state, Brazil**. Revista de Geociências do Nordeste, Campina Grande, v. 7, n. 2, p. 179-192, 2021. DOI: 10.21680/2447-3359.2021v7n2ID22034.

AMARO, V. E. *et al.* **Multitemporal Analysis of Coastal Erosion Based on Multisource Satellite Images, Ponta Negra Beach,**

**Natal City, Northeastern Brazil**. Marine Geodesy, [S. l.], v. 38, sup. 1, p. 1-25, 2015. DOI: 10.1080/01490419.2014.904257.

AMORIM, A. C. B.; SCUDELARI, A. C.; AMARO, V. E.; MATOS, M. F. A. de. **Variabilidade dos Extremos de Precipitação Diária na Cidade de Natal, Estado do Rio Grande do Norte, Nordeste do Brasil**. Anuário do Instituto de Geociências – UFRJ, Rio de Janeiro, v. 42, n. 4, p. 284–295, 2019.

ATAÍDE, R. M. C.; AMARO, V. E.; ANDRADE, S. A. **A governança climática no município Natal: sensos e contrassensos no ordenamento territorial, gestão urbana e ambiental**. In: ENCONTRO INTERDISCIPLINAR SOCIEDADES, AMBIENTES E TERRITÓRIOS (EISAT), 4., 2024, Natal. Anais... Natal: [s. n.], 2024.

CÂMARA, T. C. F. F. **Processo erosivo e defesas costeiras das praias de Ponta Negra e Via Costeira, Natal/RN: uma análise estrutural e ambiental**. 2023. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2023.

COMPANHIA DE ÁGUA E ESGOTO DO ESTADO DO RIO GRANDE DO NORTE (CAERN). **Chuvas em Natal: CAERN explica extravasamento de esgoto e orienta população. Natal**, RN: CAERN, 23 jun. 2023. Disponível em: https://caern.com.br/chuvas-em-natal-caern-explica-extravasamento-de-esgoto-e-orienta-populacao/. Acesso em: 27 jul. 2025.

COSTA, S. B.; HERDIES, D. L.; SOUZA, D. O. de. **Extreme Precipitation Events on the East Coast of Brazil's Northeast: Numerical and Diagnostic Analysis**. Water, Basel, v. 14, n. 19, p. 3135, 2022.

EDUARDO, A. F. **Identificação e avaliação de pontos de alagamentos nos bairros Petrópolis e Ribeira na cidade de Natal/RN com suporte de geotecnologias**. 2022. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2022.

ESPINOZA, N. S. *et al.* **Landslides Triggered by the May 2017 Extreme Rainfall Event in the East Coast Northeast of Brazil**. Atmosphere, Basel, v. 12, n. 10, p. 1261, 2021.

GEUKES, H. H. *et al.* **Sand nourishment for multifunctional coastal climate adaptation: three key implications for researchers**. Nature-Based Solutions, v. 6, p. 100191, 2024.

JANOT, L. F. **Apresentação**. In: HERZOG, C. P. (org.). Cidade para todos: (re)aprendendo a conviver com a Natureza. Rio de Janeiro: Mauad X: Inverte, 2013. p. 11-13.

LEVITUS, S. *et al.* **World ocean heat content and thermosteric sea level change (0–2000 m), 1955–2010**. Geophysical Research Letters, Washington, v. 39, n. 10, L10603, 2012.

LIANG, T.-Y. *et al.* **Accelerated Ocean thermal expansion and its contribution to Global Sea-level rise**. Journal of Sea Research, v. 205, p. 102589, 2025.

LIMA, C. C. de. **Identificação e avaliação de zonas de alagamentos urbanos na cidade de Natal, Nordeste do Brasil, com o suporte de geotecnologias**. 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2019.

LIMA, C. C. de *et al.* **Identificação e Avaliação de Zonas de Alagamentos Urbanos, com o Suporte de Geotecnologias, na Cidade de Natal, Nordeste do Brasil**. Anuário do Instituto de Geociências - UFRJ, Rio de Janeiro, v. 42, n. 2, p. 378-394, 2019.

LIU, J. *et al.* **Increasing wave power due to global climate change and intensification of Antarctic Oscillation**. Applied Energy, v. 358, p. 122572, 2024.

MACEDO, Y. M. *et al.* **Vulnerabilidade socioambiental em escala de detalhe: o caso de Mãe Luiza, Natal, RN, Brasil**. Geosaberes, Fortaleza, v. 6, n. 2, p. 145-157, 2015.

MATOS, M. F. A.; AMARO, V. E.; SCUDELARI, A. C.; ROSADO, S. B. **Estimativas das alterações de longo prazo na linha de praia do Litoral Oriental do Rio Grande do Norte, Nordeste do Brasil**. Revista Brasileira de Geomorfologia, [S. l.], v. 23, n. 1, jan./mar. 2022. DOI: 10.20502/rbg.v23i1.1953.

MERCHANT, C. J.; ALLAN, R. P.; EMBURY, O. **Quantifying the acceleration of multidecadal global sea surface warming dri-**

**ven by Earth's energy imbalance**. Environmental Research Letters, [S. l.], v. 20, n. 2, p. 024037, 2025.

MOLION, L. C. B.; BERNARDO, S. O. **Uma revisão da dinâmica das chuvas no Nordeste Brasileiro**. Revista Brasileira de Meteorologia, [S. l.], v. 17, n. 1, p. 1-10, 2002.

NATAL (RN). **Lei Complementar nº 082, de 21 de junho de 2007**. Institui o Plano Diretor de Natal e dá outras providências. Diário Oficial do Município, Natal, RN, jun. 2007.

NATAL (RN). **Lei Complementar nº 208, de 01 de novembro de 2022**. Institui o Plano Diretor de Natal e dá outras providências. Diário Oficial do Município, Natal, RN, 01 nov. 2022.

NATAL (RN). **Lei nº 7.801, de 23 de dezembro de 2024**. Dispõe sobre o uso e ocupação do solo e estabelece prescrições urbanísticas das Áreas Especiais de Interesse Turístico e Paisagístico - AEITPs, instituídas pela Lei Complementar nº 208, de 07 de março de 2022, e dá outras providências. Diário Oficial do Município, Natal, RN, 26 dez. 2024.

NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION (NASA). Sea Level Rise. [S. l.]: NASA, 2025. Disponível em: https://sealevel.nasa.gov/. Acesso em: 23 out. 2025.

PINHEIRO, L. R. S. G. *et al.* **40 Years Extreme Offshore Waves off the Eastern Continental Shelf of Rio Grande do Norte, Northeast Brazil**. Revista Brasileira de Geografia Física, v. 16, n. 2, p. 1040-1059, 2023.

REGUERO, B. G.; LOSADA, I. J.; MÉNDEZ, F. J. **A recent increase in global wave power as a consequence of oceanic warming**. Nature Communications, v. 10, n. 1, p. 205, 2019.

RIBEIRO, M. S. M. *et al.* **Intense Precipitation and Area of Risk: A Case Study of Mass Movement in the City of Natal, Brazil**. Water, Basel, v. 13, n. 23, p. 3346, 2021.

SAENGSUPAVANICH, C. *et al.* **Jeopardizing the environment with beach nourishment**. Science of the Total Environment, v. 868, p. 161485, 2023.

SCHOONEES, T., *et al*. **Hard Structures for Coastal Protection, Towards Greener Designs**. Estuaries and Coasts, v. 42, p. 1709–1729, 2019. DOI: 10.1007/s12237-019-00551-z.

SCHWARTZ, S. E. **Heat capacity, time constant, and sensitivity of Earth's climate system**. Journal of Geophysical Research, v. 112, D24S05, 2007.

SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL (CPRM). **Avaliação geológica-geotécnica do escorregamento no bairro Mãe Luíza, município de Natal - RN**. Recife: CPRM, 2014. Relatório Técnico. Disponível em: https://rigeo.cprm.gov.br/jspui/handle/doc/15089. Acesso em: 23 out. 2025.

TETRA TECH. **Estudo de Impacto Ambiental (EIA) e Relatório de Impacto Ambiental (RIMA) do Projeto de Engorda da Praia de Ponta Negra**. Natal: Tetra Tech, 2022.

TORRES, R. R.; FERREIRA, N. J. **Case Studies of Easterly Wave Disturbances over Northeast Brazil Using the Eta Model**. Weather and Forecasting, v. 26, n. 2, p. 225-238, 2011.

TRIBUNA DO NORTE. **Engorda de Ponta Negra: especialistas apontam necessidade de manutenção**. Tribuna do Norte, Natal, RN, 24 jun. 2024. Disponível em: https://www.tribunadonorte.com.br/noticia/engorda-de-ponta-negra-especialistas-apontam-necessidade-de-manutencao/591557. Acesso em: 23 out. 2025.

VAN DER MEULEN, F.; IJFF, S.; VAN ZETTEN, R. **Nature-based solutions for coastal adaptation management, concepts and scope, an overview**. Nordic Journal of Botany, [S. l.], v. 2023, n. 1, p. e03290, 2022.

WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION (WMO). **State of the Global Climate 2024**. Genebra: WMO, 2025. (WMO-No. 1368). Disponível em: https://wmo.int/publication-series/state-of-global-climate-2024. Acesso em: 23 out. 2025.

6

# *URBAN INFRASTRUCTURE AND THE DOUBLE WATER THREAT: VULNERABILITY TO COASTAL EROSION AND RAINWATER FLOODING IN NATAL (RN)*

**VENERANDO EUSTÁQUIO AMARO, SARAH DE ANDRADE E ANDRADE E GABRIEL DALLA ROSA CARVALHO**

## *SUMMARY*

The urban infrastructure of Natal (RN) faces a systemic vulnerability, the product of a double and synergistic water-related threat: chronic coastal erosion and rainwater flooding. This condition is not configured as a mere byproduct of the climate crisis, but rather the result of a development model that persistently neglects natural dynamics, culminating in an actively constructed risk scenario. Historical responses, based on rigid infrastructure and a deficient drainage system, have set up a cycle of maladaptation, exacerbating risks and generating cascading failure. The paradox deepens with Natal's new Master Plan, which simultaneously adopts a discourse of resilience while promoting densification in vulnerable areas. It is concluded that, beyond technical challenges, a central obstacle to resilience lies in the crisis of urban governance, which requires a paradigmatic shift towards integrated and adaptive planning.

**Keywords**

Coastal Vulnerability; Climate Governance; Social and Environmental Risks.

DOI: 10.66949/b8x4n7q1

## 1. INTRODUCTION

Global climate change, driven by anthropogenic forcings, is fundamentally altering the Earth system's energy balance. This process is evidenced by the Earth's growing energy imbalance, which manifests primarily in the warming of the oceans, which act as the planet's main heat reservoir, absorbing approximately 93% of the excess energy accumulated in the climate system since 1955 (Levitus *et al.*, 2012). The acceleration of sea surface warming, driven by the Earth's energy imbalance, shows an intensification trend. The rate of warming rose from 0.06 K $^{decade-1}$ in the period 1985–1989 to 0.27 K $^{decade-1}$ between 2019–2023. It is essential to clarify that the *Kelvin unit per* $^{decade-1}$ (K $^{decade-1}$) is used to express the rate of temperature variation over a ten-year period, and is a metric frequently used in climatology and climate change studies to describe the warming or cooling trend over time (Schwartz, 2007). Furthermore, this variation in Kelvin (ΔK) is numerically identical to the variation in degrees Celsius (Δ°C). This trend projects that the cumulative warming of 0.53 K over the past 40 years is likely to be exceeded in the next two decades (Merchant *et al.*, 2025).

This heat storage in the oceans—an increase of $24.0 \times 10^{22}$ Joules in the 0-2,000 m layer between 1955 and 2010—has two direct and interconnected consequences: the thermal expansion of the water column and the intensification of the hydrological cycle (Levitus *et al.*, 2012). Thermal expansion is the main component of global mean sea level (MSL) rise, accounting for 56% of the total rate of rise (Liang_*et al.*, 2025), in addition to the melting of glaciers and ice sheets. Measurements by altimeter satellites, which began in 1993, reveal that the rate of elevation has more than doubled: it increased from 2.1 mm/year between 1993 and 2002, to 4.7 mm/year over the past decade (WMO, 2025). Cumulatively since 1993, the MSL has already risen by approximately 10 cm. The continued acceleration indicates that past trends are insufficient for projecting future impacts, requiring constant

revisions of coastal risk and adaptation models to the impacts of rising MSL (NASA, 2025).

Concomitantly, the accumulation of energy in the ocean system transfers more energy to the atmosphere, which intensifies the energy flow of the wave climate. This process includes an increase in Global Wave Power (GWP), which is a measure of kinetic and potential energy transferred from the wind to sea surface motion, and which also represents the potential for electricity generation on a global scale. Long-term analyses indicate that the GWP has shown an upward trend, with an increase of 0.47% per year between 1948 and 2008, which is statistically related to sea surface warming. This upward trend is consistent with more recent studies, which confirm the increase in GWP as a consequence of global climate change and the intensification of major global climate oscillations, which modulate atmospheric circulation and wave energy (Reguero *et al.*, 2019; Liu *et al.*, 2024).

In the South Equatorial Atlantic region, which borders the coast of northeastern Brazil, the global climate pattern interact with a complex set of meteorological systems that influence the local precipitation dynamics. The Intertropical Convergence Zone (ITCZ) act as the primary large-scale modulator of the annual rainfall regime, with its seasonal latitudinal migration determining the rainy and dry periods in the region (MOLION; BERNARDO, 2002). Concurrently, the area is influenced by the Eastern Wave Disturbances (EWD). These are mesoscale synoptic systems that propagate in the trade winds of the Atlantic Ocean towards the cost (Torres; Ferreira, 2011) and are recognized as critical mechanisms in the onset of most Extreme Precipitation Events (EPE). This interaction, fueled by the intense convergence of humidity resulting from warmer ocean temperatures, increases the likelihood of extreme events capable of generating precipitation totals exceeding 200 mm in 24 hours (Espinoza *et al.*, 2021; Costa *et al.*, 2022). The impact of these disturbances is, in turn, directly associated with the occurrence of floods and disasters in coastal

urban areas of Natal, intensifying the vulnerability of the infrastructure to rainfall and geological risks (Ribeiro *et al.*, 2021).

The result is a dual and synergistic water-related threat to coastal areas: on the one hand, a chronic process of coastal erosion, intensified by higher MSL and more energetic wave climate; on the other, recurring flooding, triggered by EPE, which have shown a trend towards intensification in the region over the past few decades.

In this context, the city of Natal, capital of the state of Rio Grande do Norte (RN), emerges as an emblematic case study of the high vulnerability of coastal cities in the Brazilian Northeast to the impacts of climate change and adaptation solutions. Its socioeconomic identity, anchored in tourist activity—whose main assets are iconic landscapes such as Morro do Careca and Ponta Negra Beach—, is intrinsically linked to the stability of its coastline. The core of the local problem lies in the urban development model, starting in the 1980s, characterized by rapid land-use expansion in conflict with coastal morphosedimentary and hydrological dynamics. This process resulted in the suppression of vegetated areas, dune fields and foreshore zones, accompanied by extensive sealing of drainage basins and the occupation of areas of high physical and environmental vulnerability (Amaro *et al.*, 2015; 2021; Câmara, 2023).

Consequently, Natal's urban and environmental systems—including buildings, road networks, sanitation and energy infrastructure—were largely designed based on steady-state climatic parameters. This premise makes them systemically vulnerable to the new dynamics imposed by the climate crisis, requiring a paradigmatic transition: from a reactive, emergency-based management model to proactive, integrated, and adaptive planning.

## 2. THE DOUBLE CLIMATE THREAT IN NATAL

### 2.1. The dynamics of coastal erosion on the coast of Natal: Urbanization, rigid works and the acceleration of risk

The coastal erosion process along the coast of the municipality of Natal is a complex phenomenon driven by the interaction of multi-scale factors. On a global scale, the phenomenon is exacerbated by climate change, manifested by rising mean sea level and a global increase in wave energy flux (Reguero *et al.*, 2019). Locally, along the coastal strip of Ponta Negra and Via Costeira, the average incident wave energy flux corresponds to a wave climate with significant eave heights—a parameter representing the average of the top third of the waves, which is essential for analyzing impacts, such as erosion potential and damage to coastal structures—ranging from moderate (1.52 m) to very energetic (> 2.36 m), which explains the intense sedimentary dynamics and the risks associated with coastal erosion in the area (Almeida *et al.*, 2015; Pinheiro, 2023).

The scenario is exacerbated by a combination of human factors resulting from the urbanization of the southern portion of the coastline, from the 1980s onwards. The role of the Dunas Park-Via Costeira Project stands out, which combined the creation of the first Conservation Unit (UC) in the state (1977)—the Dunas do Natal "Jornalista Luiz Maria Alves" State Park—with the construction of an expressway (RN-301) that connected the beach and the Ponta Negra neighborhood to the municipality's central waterfront, an area already densely populated.

Opened in 1981, the construction of the Via Costeira marked the municipality of Natal's entry into the "megaprojects route" for tourism expansion, aiming to attract national and international investments (the latter materialized primarily from the 2000s onwards) through the development of the waterfront. This process culminated in the stabilization of the coastline through rigid infrastructure, to protect public and private infrastructure, and in the

removal of dune vegetation—interrupting the natural sedimentary balance of the beach-dune system and creating a chronic sediment deficit. Additionally, the rainwater drainage system, with multiple direct discharge points onto the shoreline and the beach face, drastically alters the coastal morphodynamics and aggravates sediment loss (Amaro *et al.*, 2015). As a result, the combination of these factors has made Natal's urban coastline highly physically and environmentally vulnerable to the growing impacts of climate change (Amaro *et al.*, 2015; Tetra Tech, 2022; Câmara, 2023).

A multitemporal analysis of shoreline evolution along Ponta Negra and Via Costeira reveals an acceleration of the erosion process over the past five decades. From 1973 to 1986, prior to intensive urbanization, the beach exhibited a relatively stable sedimentary balance: an average shoreline retreat rate of -3.7 m/year near Morro do Careca, counterbalanced by a sedimentary deposition of 4.2 m/year in the northern sectors, towards Via Costeira (Amaro *et al.*, 2015). However, following the urban consolidation of the coastline, the erosive trend became widespread, shifting to an average erosion rate of -1.5 m/year between 1986 and 2012 (Amaro *et al.*, 2015).

The erosive process intensified significantly between 2008 and 2018, spreading to the northern areas that had previously been in equilibrium (Matos *et al.*, 2022). New analyses, based on geospatial modeling of multitemporal satellite imagery from 1986 and 2022, specifically from the LANDSAT (*National Aeronautics and Space Administration* - NASA program) and SENTINEL-2 (*European Space Agency* - ESA program) platforms, corroborate this scenario, indicating an average erosion rate of -0a.63 m/year for the entire sector, with the section near Morro do Careca standing out, with values of -0.84 m/year (Figure 1). Other analyses using satellite imagery between 1992 and 2022—that is, only from the 1990s onwards—corroborate this scenario, indicating an average erosion rate of up to -1.19 m/year for Ponta Negra beach (Câmara, 2023).

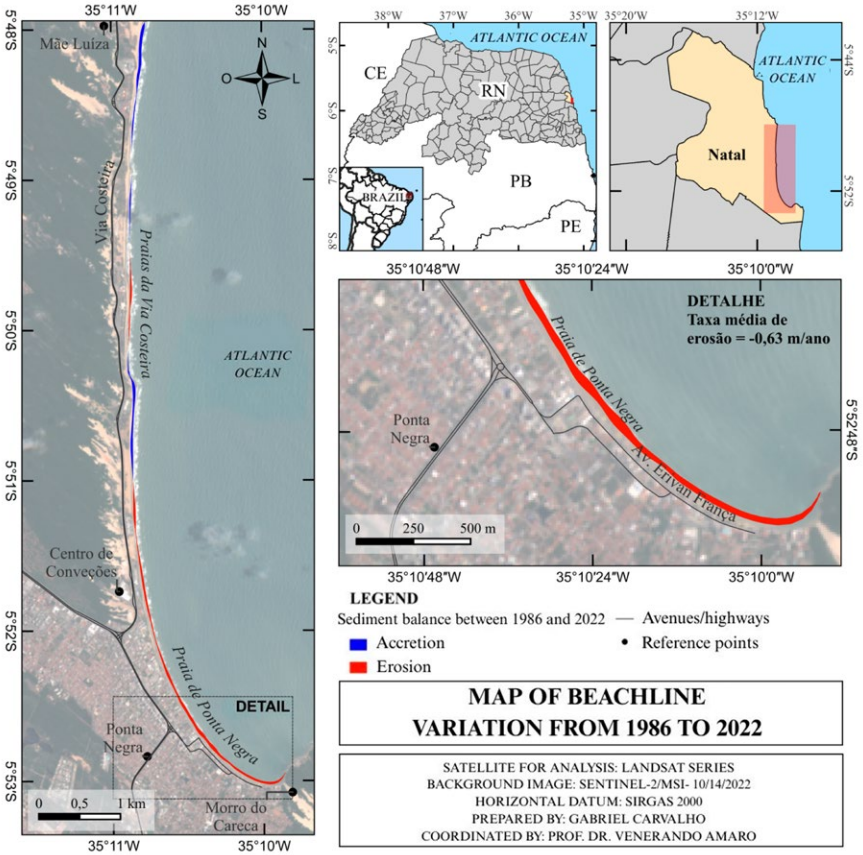



**Figure 1:** Analysis of the variation of the coastline (1986-2022) on the beaches of Ponta Negra and Via Costeira (Natal/RN), with emphasis on the sedimentary balance (erosion and accretion sectors) and the rates of variation, obtained from the geospatial modeling of a multitemporal series of images from the LANDSAT satellite. *Source: Prepared by the authors.*

Historically, the response to stabilizing the shoreline in this predominantly erosive scenario has been the implementation of rigid engineering solutions, such as rockfill, retaining walls and *betonblock*. The adoption of these structures was accelerated after 2012, when a combination of high waves, extreme rainfall events and high tide conditions destroyed about 2.5 km of the seaside promenade at Ponta Negra beach, as shown in Figure 2A (Amaro *et al.*,

2012; 2015). However, these interventions, implemented reactively and without proper analysis of hydrodynamic forcings, intensified coastal erosion (Figures 2B, 2C and 2D), constituting an emblematic case of poor adaptation of protective infrastructure to the impacts of climate change (Câmara, 2023). Between 2016 and 2022, following the installation of the infrastructure, beach line retreat rates reached up to -3.75 m/year and a net retreat of -31 m, equivalent to an average erosion rate exceeding -5.1 m/year in some sections (Câmara, 2023).

**Figure 2:** (A) View of Ponta Negra Beach in 2012, following the destruction of the infrastructure installed along the shoreline; (B) Rockfill work using boulders to protect the slope; (C) In sections of Ponta Negra and Via Costeira beaches, high tide levels recurrently reach the base of the containment structures; (D) Erosion process triggered by the *betonblock* retaining wall, with an energy dissipator installed. *Source: Photographic records taken by the authors.*

Rigid engineering interventions, implemented reactively, have exacerbated coastal erosion by increasing wave energy reflection, which has led to the deepening of the beach profile at the base of the structures and the lateral migration of the erosive process (Amaro *et al.*, 2015; Câmara, 2023). This instability is exacerbated by the progressive increase in MSL and the energy flow of the wave climate. Extreme events, with waves exceeding 2.65 m, are expected every two years, threatening the integrity of coastal defenses and the urban one along the shoreline (Pinheiro *et al.*, 2023). Therefore, the current high vulnerability stems from the synergistic interaction between an initial sedimentary deficit, poorly adapted engineering solutions, and the progressive intensification of climate drivers.

## 2.2. Extreme precipitation events and the failure of urban drainage

The city of Natal faces a double and severe water vulnerability. The risk lies not only in the intensification of oceanic drivers, such as wave conditions and currents, but also extends to rainfall vulnerability. This vulnerability manifests itself through the worsening extreme weather events (EWE), as evidenced by climatological analyses of the past three decades—a phenomenon driven by the action of the ITCZ and the EWD with the dynamics of multiple mesoscale synoptic systems affecting the coast (Torres; Ferreira, 2011; Amorim *et al.*, 2019).

Although the frequency did not show a significant change, the average intensity of extreme rainfall rose from 95.7 mm to 111.5 mm, with the threshold for a daily extreme event (98th percentile) set at approximately 70 mm (Amorim *et al.*, 2019). Such events, of which 75% are concentrated in the rainy season from April to July, can produce accumulations of 60 mm in just three hours and daily totals exceeding 100 mm, capable of triggering flooding and even large-scale gravitational mass movements, such as the disaster that occurred in June 2014 in the neighborhood of Mãe Luiza (Ribeiro *et al.*, 2021). This new climatic reality exceeds

the capacity of a drainage system historically designed for a scenario of lower density, based on retention ponds and the direct discharge of rainwater into water bodies and along the coastline (Amaro *et al.*, 2015).

The risk of flooding is exacerbated by the massive and increasing soil sealing resulting from urban expansion across a complex geomorphology of dunes and river plains, which also accelerates surface runoff towards topographic depressions (shoals), thereby enhancing the likelihood of floods on roads and paved sidewalks with low permeability (Lima, 2019; Lima *et al.*, 2019; Eduardo, 2022). Deficiencies in Natal's infrastructure system and urban services stem both from flaws in its original design and from deficits in network maintenance, facts evident in its most consolidated neighborhoods (Figure 3).

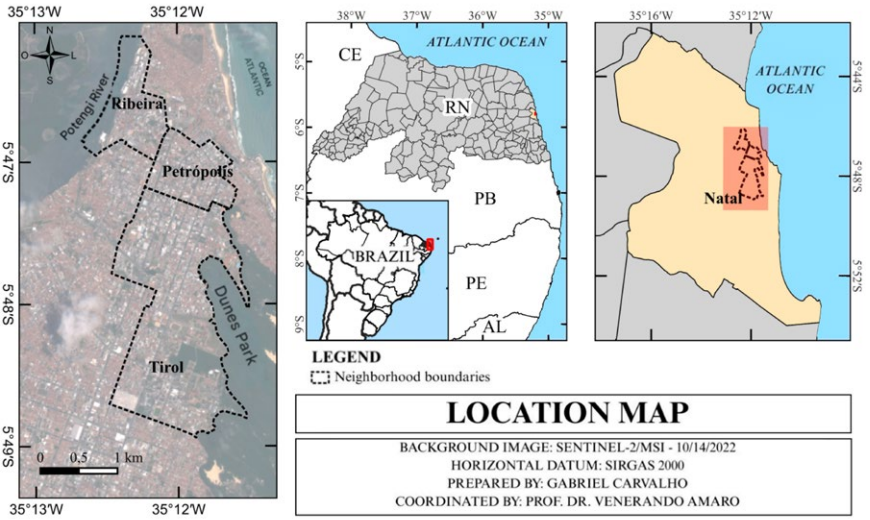



**Figure 3:** Location of the consolidated neighborhoods of Tirol, Petrópolis and Ribeira (Natal/RN), study sectors that present high vulnerability to flooding.
*Source: Prepared by the authors.*

In neighborhoods such as Tirol, the rainwater drainage system reaches a high coverage—99%. However, this coverage does not guarantee the necessary functionality. The system proves to be severely undersized, revealing a critical mismatch between precipitation volume and the recorded flooding level in critical topographic depressions (Lima, 2019), as illustrated in Figure 4. This condition poses a high risk of flooding, even in urban areas with apparently well-established infrastructure. In others areas, such as Ribeira and Petrópolis (Figure 5), which are also served by a drainage system, the problem is aggravated by precarious maintenance, manifested in storm drains clogged with sediments and debris, deteriorated structures, and sections lacking grid boxes, covers and drains made of concrete or cast iron, which renders them inoperable, as shown in Figure 6 (Eduardo, 2022).

Analyses also reveal design flaws, such as culverts oriented in the opposite direction of topographic surface flows, which overload the system, and drainage system intake structures installed above the average level of runoff and accumulation of rainwater (Lima, 2019; Lima, *et al.* 2019b; Eduardo, 2022). This combination of factors establishes a direct correlation between rainfall and severe flooding, which is triggered even by moderate precipitation (*e.g.*, >20 mm/h; Lima *et al.*, 2019; Figure 4C), affecting vital roadways and entire neighborhoods throughout the city.

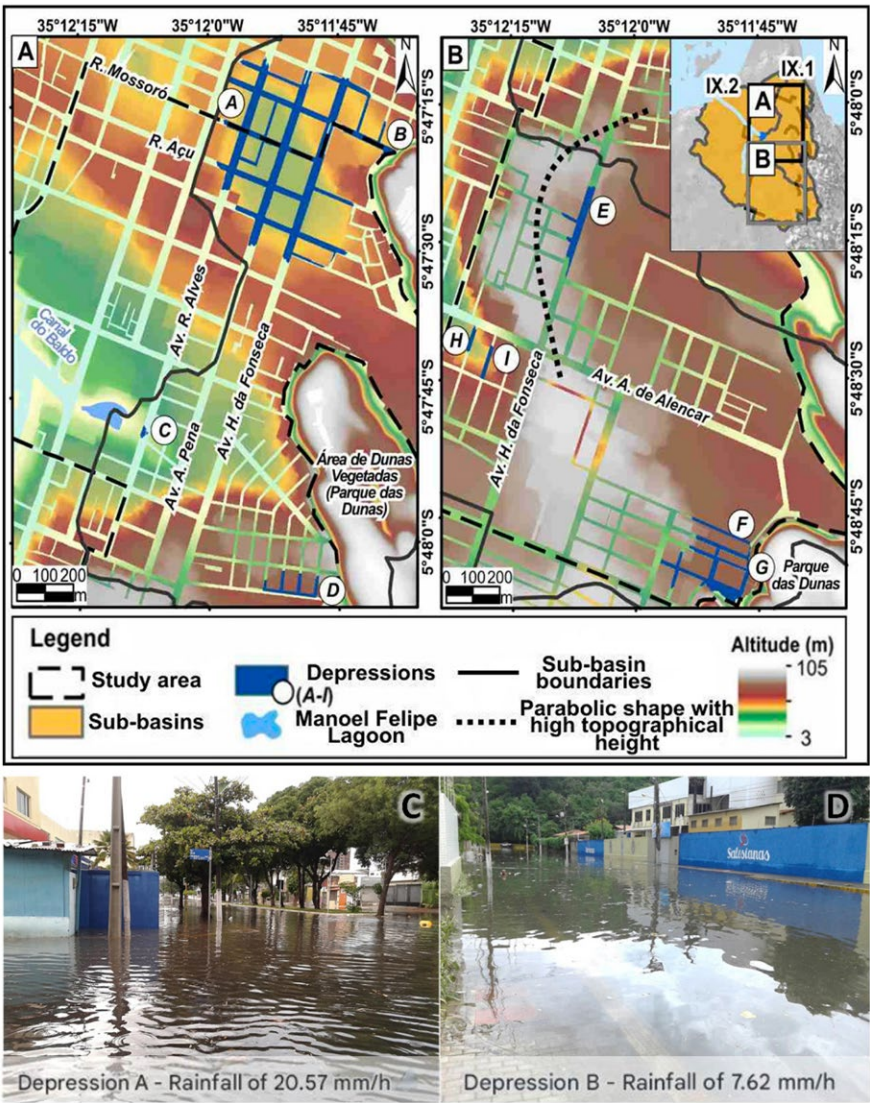



**Figura 4:** Location of the topographic depressions identified in the street system and related to the local geomorphology and spatial arrangement of the buildings in the Tirol neighborhood: (A) Depressions *A*, *B*, *C,* and *D* in the northeast sector; (B) Depressions *E*, *F*, *G*, *H* and *I* in the southern sector; (C) Recurrent flooding on access roads to hospitals and commercial areas; (D) Flooding in front of the school, medical clinics and residences. *Source: Adapted by the authors from Lima (2019).*

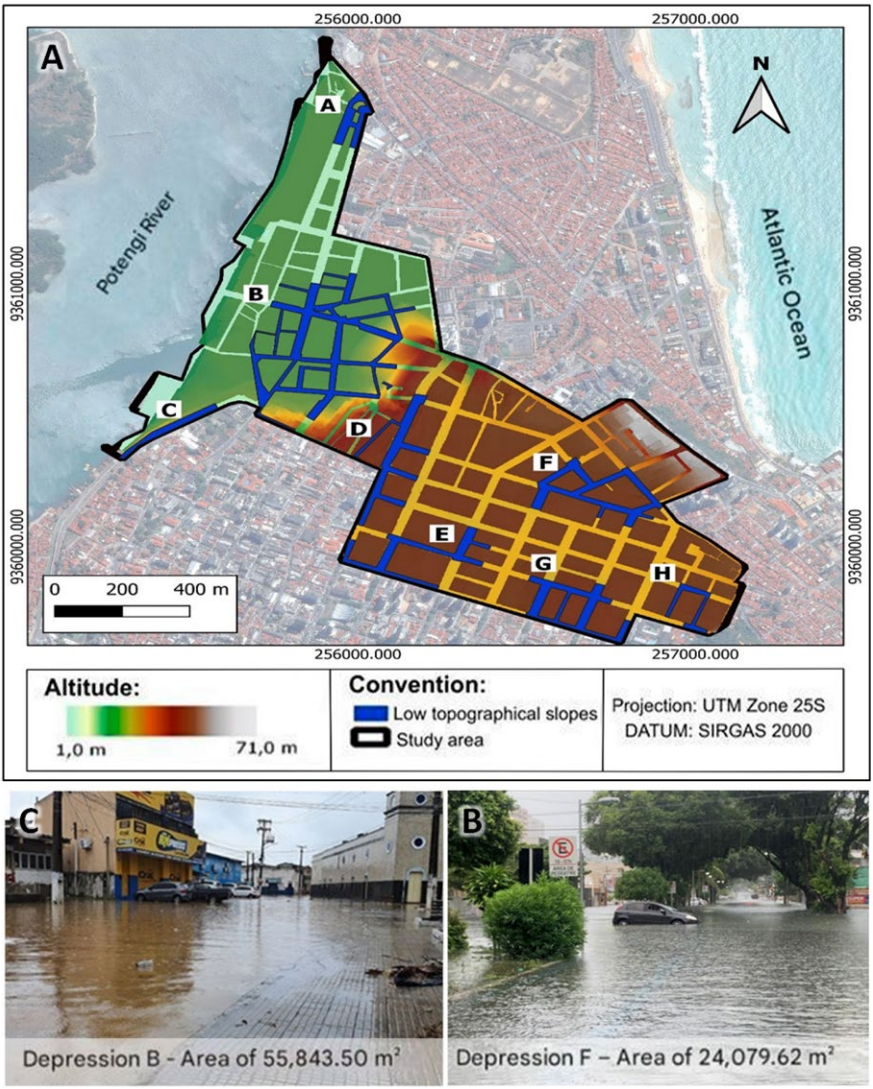



**Figure 5:** Location of the topographic depressions identified in the street system and related to the spatial arrangement of the buildings in the neighborhoods of Ribeira and Petrópolis: (A) Depressions A, B, C, and D in the neighborhood of Ribeira; (B) Depressions *E*, *F*, *G* and *H* in the Petrópolis neighborhood; (C) Flooding on the main access road to the Ribeira neighborhood and the Port of Natal; (D) Recurrent flooding in the Petrópolis neighborhood reaching commercial areas and residences. *Source: Adapted by the authors from Eduardo (2022).*

**Figure 6:** Examples of deficient maintenance in the drainage system of Ribeira and Petrópolis, as evidenced by silting, obstruction, and deterioration of storm drains. *Source: Photographic records taken by the authors.*

## *3. THE VULNERABILITIES OF NATAL'S INFRASTRUCTURE*

### 3.1. Rainwater management and degradation of the urban infrastructure and services system

The urban infrastructure and services system—which encompasses drainage, sewage, and water supply infrastructure; public sanitation and solid waste management; mobility and accessibility; and energy and communications—forms the backbone of urban functionality. In Natal, the failure of this infrastructure during heavy rainfall events is a chronic symptom. The drainage system—which is undersized—collapses functionally, and the water overload

extends to the sanitary sewage network. This network, not designed for the rainfall volumes of EWEs, overflows onto public roads due to increased flow caused by illegal connections between both systems and by the inability of water to infiltrate saturated soil—a fact technically acknowledged by the Rio Grande do Norte Water and Sewage Company (CAERN, 2023).

Direct consequences include serious public health risks and infrastructure degradation, such as the undermining of road subgrades, which leads to structural pavement failures (Figure 7A). Topographic depressions in critical areas, such as major road intersections, become impassable flooding points, even with light to moderate rainfall, compromising traffic flow (Figure 7B; Lima *et al.*, 2019; Eduardo, 2022). This creates a cycle of deterioration in which flooding not only disrupts mobility but also physically damages the other systems, compromising them in the long term.

Even more critically, the interplay between rainfall and geotechnical risks is catastrophic, due to the predominance of sandstone rocks and sandy soils in a cliff landscape covered by dune fields, which are among the triggering factors of the Mãe Luíza disaster (Ribeiro *et al.*, 2021). At that time, a large-scale landslide was triggered by an extreme rainfall event, which accumulated approximately 340 mm in 36 hours—the highest concentrated volume recorded in the city over the past 50 years. This disaster, which resulted in the destruction of roads and buildings (Figures 7C and 7D), is technically attributed to the combination of hydraulic failure of the sandy soil and the high geotechnical vulnerability of the site (CPRM, 2014). The situation was drastically enhanced by the historical neglect on the part of public authorities, which allowed the consolidation of settlements in high-risk areas, coupled with the absence of adequate rainwater drainage and basic sanitation systems. These omissions were factors that directly contributed to soil saturation due to infiltration and the consequent slope failure caused by loss of cohesion (Macedo *et al.*, 2015).

**Figure 7:** (A) Structural collapse of the road pavement in the Petrópolis neighborhood and sinking of a vehicle due to undermining of the subgrade; (B) Pavement failure and vehicle fall due to loss of trafficability during a flooding event; (C) General view of the mass movement in the neighborhood of Mãe Luíza (June 2014); (D) Detail of the destruction of the infrastructure system and buildings.
*Sources: Adapted by the authors from: https://fiscalambiental.wordpress.com/; https://g1.globo.com/rn/; https://agorarn.com.br/.*

## 3.2. Coastal erosion and the disruption of the infrastructure system and urban services on the shore

On the beaches of Natal, sediment deficit increases the vulnerability of coastal infrastructure, as it heightens its exposure to the direct action of hydrodynamic forces. The coastal erosion process, by eliminating the energy-dissipating function of the wave climate along the beach profile, intensifies the direct impact of marine hydrodynamics on rigid engineering structures. Currently,

the base of these retaining structures is already frequently reached by the indistinct reach of high tides, indicating the loss of natural buffer zone and an increased structural risk (Figure 2C). This situation intensifies damage to utility networks (e.g., drainage systems, sanitary sewers, and cabling), typically installed beneath road embankments and boardwalks, culminating in their rupture and collapse. A prime example of this process was the destruction, in July 2012, of a segment of the avenue and the boardwalk bordering Ponta Negra beach, which illustrates the direct impact of chronic coastal erosion and storm surges on built heritage (Amaro et al., 2015).

The primary mechanism behind the collapse of these rigid retaining structures is scour at the base, which compromises their foundation. The energy of the waves, upon colliding and being reflected by the rigid infrastructure (rockfill and walls) intensifies the removal of sediment that provides geotechnical support, generating differential settlements and instability (Schoonees *et al.*, 2019). This process is evidenced by the displacement and rolling of rock blocks and concrete modules of the *betonblock* toward the beach face and the exposure of technical network components (Câmara, 2023). Corroborating this analysis, studies document severe structural pathologies in the infrastructures along the Ponta Negra shoreline and on Via Costeira, the collapse of sections of the rainwater drainage network, and the undermining of the retaining walls foundations. Such damage is a direct consequence of the erosion-induced loss of the beach profil (Figure 8A), a process that eliminates the natural barrier for wave energy dissipation and exposes urban infrastructure to the direct impact of marine hydrodynamics (Tetra Tech, 2022; Câmara, 2023).

In addition, an anthropogenic factor accelerates sediment removal and compromises the stability of the beach face: Natal's rainwater management system, which historically directs runoff to multiple discharge points directly along the coastline (Figure 8B, Amaro *et al.*, 2015). This concentrated flow has enough energy to actively transport beach sediments, functioning as "artificial

bleeds" that excavate channels and destabilize the beach profile, as shown in Figure 8C (Alff, 2019; Câmara, 2023). This runoff is often contaminated by clandestine sewage connections, generating the phenomenon known as the "black tongue"—an effluent that, in addition to being source of erosive incision on urban beaches, represents a serious environmental and public health hazard (Figure 8D).

**Figure 8:** Direct impacts of the negative synergistic effects of rigid infrastructure (rockfill, retaining wall and *betonblock*) on coastal erosion and vice versa: (A) severe removal of sediments in the beach profile, which exposes structures to wave action; (B) Point of direct discharge of rainwater onto the beach face; (C) Drainage flow acting as an "artificial bleed", eroding and destabilizing the beach profile; (D) Discharge of effluent contaminated by sewage ("black tongue"), constituting an environmental and public health hazard. *Source: Photographic records taken by the authors.*

## 4. TOWARDS RESILIENCE: ADAPTATION STRATEGIES IN NATAL

### 4.1. Controversies in the artificial fattening of the beaches of Ponta Negra and Via Costeira

The erosion process on the beaches of Ponta Negra and Via Costeira is a prime example of the challenges and missteps in Brazilian coastal management. Although the artificial beach nourishment (or hydraulic filling) of a 2.5 km stretch of shoreline had been the technical solution recommended in an Expert Report since 2012 (Amaro *et al.*, 2012), the following decade was marked by reactive interventions that aggravated the problem. Rigid engineering structures (rockfill, retaining walls, and concrete blocks) were installed, which, combined with an obsolete rainwater drainage system, accelerated coastal erosion and expanded the problem to adjacent sectors on the Via Costeira (Câmara, 2023). Such actions constitute a clear process of maladaptation of the shoreline to the effects of rising sea levels and the energy flow of already established waves, intensifying the system's vulnerability and making the definitive solution more complex, extensive, and costly.

The belated intervention carried out on the southern coast of Natal, in the form of hydraulic beach nourishment—a technique that consists of dredging sand from underwater deposits and pumping it into the back-shore area to restore and widen the beach profile—was carried out between August 2024 and January 2025. The project, which extends 4.5 km along the coastline and aims to widen the sandy strip by up to 100 m, is conceptually aligned with modern coastal adaptation and protection strategies, being classified as a form of 'flexible' coastal engineering or as a Nature-based Solution (NbS). Such solutions are recognized for promoting multifunctionality and seek to mitigate the impacts of erosion, unlike 'rigid' structures (Tetra Tech, 2022; Van Der Meulen *et al.*, 2023; Geukes *et al.*, 2024). However, the sustainability of the intervention intrinsically depends on rigorous execution, maintenance,

and management. Nevertheless, the project was initiated without all the necessary environmental permits and carried out without the support of adequate environmental inspection, in addition to having an accelerated schedule, resulting in an unstable beach profile. Consequently, from a physical environment perspective, high, steep berm escarpments formed, and the landfill became vulnerable to the runoff from rainwater and sewage, which erode, flood and contaminate the newly deposited sediments (Tribuna do Norte, 2024).

These failures have led to serious social problems, such as limited access for swimmers and waterfront workers; an increased risk of drowning due to new rip currents; and economic losses linked to a decline in beachgoers—all of which demonstrate that the project, instead of restoring well-being, has created insecurity. The case illustrates the critical paradox highlighted by Saengsupavanich *et al.* (2023): artificial beach nourishment projects, when poorly executed, degrade the coastal environment and the social fabric, becoming examples of poor governance that prolong and amplify the crisis.

## 4.2. The (in)existence of climate governance in Natal

In recognition of the vulnerabilities outlined above, the new Natal Master Plan (Plano Diretor de Natal – PDN) (Natal, 2022) incorporates measures to mitigate and adapt to the harmful urban effects of climate change, as well as the need to promote climate balance, as guidelines for the municipality's urban planning. Despite being the first to explicitly address climate change, the new PDN relaxes environmental protection measures and building codes, contradicting its own objectives and guidelines. Along the coastline, despite extensive research and proof of its fragility, there is a set of prescriptions that ignore the social, biological and ecosystem services played by the qualification of land use and its respective infrastructure. Instead of restricting occupation in areas of high vulnerability to erosion and flooding, for example, the PDN and its derived legislation, define (Chart 1):

**Table 1:** Main urban prescriptions for the Ponta Negra and Via Costeira waterfront and their changes from the new Natal Master Plan

| PARAMETERS | TERRITORY | PRESCRIPTIONS | | CONSEQUENCES | ALTERNATIVES |
|---|---|---|---|---|---|
| | | PDN 2007 Related Legislation | PDN 2022 Related Legislation | | |
| **ZONING** | Ponta Negra and Via Costeira | Special Area of Tourist and Landscape Interest | Special Area of Tourist and Landscape Interest | Formal fit | - |
| **NON AEDIFICANDI AREA (ANA)** | Ponta Negra | Here is the Municipal Decree 2.236/1979 | Extinct | More built-up and impermeable area, vegetation suppression, increased surface temperature | Implementation of a linear park |
| **FEEDBACK CONTROL** | Ponta Negra | 7.5 m from any point on the ground | 7.5m from the highest level of the curb | Greater obstruction of the landscape, trend of expansion of occupation | Maintenance of the measurement parameter, considering less landscape impact |
| | Entorno do Parque das Dunas (State Conservation Unit) | Jig control ranges: 7.5m; 12m; 15m; 30m; and up to 100m | Extinct | Edge effect | Maintenance of gauge/damping control |
| | Coastal Route | Limited to the height of the Avenue or up to 7.5m where there is obstruction of the landscape | 15m from the Avenue | Incentive to construction and waterproofing, increase in surface temperature, increase in erosion | Implementation of parks and equipment for collective use and green infrastructure |
| **LAND USE** | Ponta Negra | Mixed Use | | Maintenance of land use conditions | Disincentive to occupation on the coastline, implementation of equipment for public use and green infrastructure |
| | Via Costeira | Support equipment for tourism and institutional activities | Multi-property residential use has been added | More built and impermeable area, increased surface temperature, tendency to privatize space | |
| **COEFFICIENT OF UTILIZATION** | Ponta Negra | 1.0 and 1.2 | 3,5, and may reach 5,0, if urban incentives are used | Incentive to construction and waterproofing, increase in surface temperature, increase in erosion, overload of infrastructure | Maintenance of low occupancy rates by encouraging the removal of rigid infrastructures from the coastline |
| | Coastal Route | 0.2 and 1.0 | | | |

| PARAMETERS | TERRITORY | PRESCRIPTIONS | | CONSEQUENCES | ALTERNATIVES |
|---|---|---|---|---|---|
| | | PDN 2007 Related Legislation | PDN 2022 Related Legislation | | |
| **WATERPROOFING RATE** | Ponta Negra | Up to 80% | Up to 90%, adopting a batch infiltration system | Less rainwater infiltration and retention surface | Decrease in the waterproofing rate, recommendation for the use of drainage pavements and SBNs |
| | Via Costeira | 25% a 40% | | | |
| **SHORELINE STABILITY MECHANISMS** | Ponta Negra e Via Costeira | Non-existent | Individually licensed project, using existing solutions (modular rockfill); | It is important to note, but it reinforces the individualized solutions and the rigidity on the coastline | Disincentive to occupation on the coastline, implementation of equipment for public use and green infrastructure |

*Source: Authors' systematization (2025) from Natal (2007; 2022; 2024)*

This contradiction—evident in the fact that the PDN, at the same time, recognizes the risks to occupation in areas susceptible to coastal erosion, landslides, and flooding, yet permits densification in those same areas—reveals a discourse in favor of urban resilience and the lack of climate governance, in practice (Ataíde *et al.*, 2024). Such resilience must involve a complex articulation between civil society and public authorities, especially represented here by the Civil Defense, Secretariat of Environment and Urbanism (SEMURB) and Institute for Sustainable Development and Environment of Rio Grande do Norte (IDEMA), whose monitoring, licensing and inspection actions are crucial to avoid the creation of new risks.

## 5. CONCLUSION

The analysis of Natal's vulnerability in light of strategies to address the impacts of the climate crisis reveals a dual and synergistic water-related threat: on the one hand, chronic coastal erosion; on the other, recurring flooding triggered by extreme rainfall events. The critical nature of the current scenario stems from the

interaction between both processes, and this vulnerability is not a mere byproduct of the global climate crisis, but a condition actively built and enhanced by an urban development model that, for decades, has neglected the dynamics of natural systems.

Coastal erosion arises from a complex interplay between land-use and development pressures on on a vulnerable geological-geomorphological substrate, the implementation of reactive engineering solutions—based on rigid and markedly poorly adapted infrastructures—and the intensification of hydrodynamic and climatic forces. In this context, the rainwater management system—which isundersized and poorly maintained—acts as a vector of double risk: failure to drain rainwater volumes, causing severe flooding, and simultaneously functions as an erosive agent by releasing concentrated flows directly onto the beach, destabilizing it and contaminating it with effluents from domestic sewage. The failure of infrastructures, therefore, creates a cascade effect that compromises the resilience and functionality of the entire coastal ecosystem, from mobility and sanitation to the geotechnical stability of high-risk areas.

The paradox of resilience in Natal is strikingly evident in recent interventions. The project to artificially replenish the beaches at Ponta Negra and a stretch of the Via Costeira, although conceptually aligned with NbS, had its effectiveness compromised by accelerated execution and governance failures, creating new physical and social risks and transforming it into a potential case of maladaptation.

Worsening this scenario, the city model proposed by the PDN ratifies and prolongs the current state of vulnerability. Although it acknowledges the climate threat in theory, the plan allows for greater density and vertical development along the waterfront, thereby reinforcing practices that harden the coastline—as a protective measure— and increase soil sealing. This dissonance between the discourse of sustainability and planning practice perpetuates a development model in conflict with the need to adapt to the climate crisis, thereby amplifying the risks. This approach, grounded in the obsolete paradigm of “gray infrastructure,” comes at the expense of the under-exploited potential of green infrastructure—such as

flood parks, rain gardens, and permeable pavements—that remains a largely untapped vector of innovation in urban planning.

This scenario imposes the urgency of reassessing local climate governance within its distinct territorial and institutional contexts. Far from being a new debate, its relevance is renewed and demands moving beyond conventional planning practices, requiring the construction of coordinated responses between governments and civil society. The ultimate goal is to achieve a dynamic and resilient balance that reintegrates the logics of natural systems—geological, hydrological and biological—into anthropogenic systems— social, circulatory and metabolic (Janot, 2013)—, ensuring a safer and more sustainable future for coastal cities in the face of the challenges of the climate crisis.

## *REFERENCES*


ALFF, R. M. L. **Análise crítica de obras civis: um estudo de caso da praia de Ponta Negra, Natal-RN**. 2019. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2019.

ALMEIDA, L. R. *et al.* **Avaliação do clima de ondas da praia de Ponta Negra (RN, Brasil) através do uso do SMC-Brasil e sua contribuição à gestão costeira**. Revista da Gestão Costeira Integrada, [S. l.], v. 15, p. 135-151, 2015. DOI: 10.5894/rgci532.

AMARO, V. E. *et al.* **Laudo Pericial – Item B: Indicação das obras emergenciais de contenção e reparação dos equipamentos públicos e de segurança dos frequentadores da Praia de Ponta Negra**. Natal, RN: [s. n.], 2012. 254 f.

AMARO, V. E. *et al.* **Analysis of physical vulnerability indices using geotechnologies in the Barreira do Inferno region of Rio Grande do Norte state, Brazil**. Revista de Geociências do Nordeste, Campina Grande, v. 7, n. 2, p. 179-192, 2021. DOI: 10.21680/2447-3359.2021v7n2ID22034.

AMARO, V. E. *et al.* **Multitemporal Analysis of Coastal Erosion Based on Multisource Satellite Images, Ponta Negra Beach,**

**Natal City, Northeastern Brazil**. Marine Geodesy, [S. l.], v. 38, sup. 1, p. 1-25, 2015. DOI: 10.1080/01490419.2014.904257.

AMORIM, A. C. B.; SCUDELARI, A. C.; AMARO, V. E.; MATOS, M. F. A. de. **Variability of Daily Precipitation Extremes in the City of Natal, State of Rio Grande do Norte, Northeast Brazil**. Yearbook of the Institute of Geosciences – UFRJ, Rio de Janeiro, v. 42, n. 4, p. 284–295, 2019.

ATAÍDE, R. M. C.; AMARO, V. E.; ANDRADE, S. A. **Climate governance in the municipality of Natal: senses and nonsense in territorial planning, urban and environmental management**. In: INTERDISCIPLINARY MEETING SOCIETIES, ENVIRONMENTS AND TERRITORIES (EISAT), 4., 2024, Natal. Annals... Natal: [s. n.], 2024.

CÂMARA, T. C. F. F. **Erosive process and coastal defenses of the beaches of Ponta Negra and Via Costeira, Natal/RN: a structural and environmental analysis**. 2023. Dissertation (Master's Degree in Civil and Environmental Engineering) – Federal University of Rio Grande do Norte, Natal, 2023.

WATER AND SEWAGE COMPANY OF THE STATE OF RIO GRANDE DO NORTE (CAERN). **Rains in Natal: CAERN explains sewage overflow and guides the population**. Natal, RN: CAERN, June 23, 2023. Available at: https://caern.com.br/chuvas-em-natal-caern-explica-extravasamento-de-esgoto-e-orienta--populacao/. Accessed on: 27 jul. 2025.

COSTA, S. B.; HERDIES, D. L.; SOUZA, D. O. de. **Extreme Precipitation Events on the East Coast of Brazil's Northeast: Numerical and Diagnostic Analysis**. Water, Basel, v. 14, n. 19, p. 3135, 2022.

EDUARDO, A. F. **Identification and evaluation of flooding points in the Petrópolis and Ribeira neighborhoods in the city of Natal/RN with the support of geotechnologies**. 2022. Dissertation (Master's Degree in Civil Engineering) - Graduate Program in Civil Engineering, Federal University of Rio Grande do Norte, Natal, 2022.

ESPINOZA, N. S. *et al.* **Landslides Triggered by the May 2017 Extreme Rainfall Event in the East Coast Northeast of Brazil**. Atmosphere, Basel, v. 12, n. 10, p. 1261, 2021.

GEUKES, H. H. *et al.* **Sand nourishment for multifunctional coastal climate adaptation: three key implications for researchers**. Nature-Based Solutions, v. 6, p. 100191, 2024.

JANOT, L. F. **Apresentação**. In: HERZOG, C. P. (org.). Cidade para todos: (re)aprendendo a conviver com a Natureza. Rio de Janeiro: Mauad X: Inverte, 2013. p. 11-13.

LEVITUS, S. *et al.* **World ocean heat content and thermosteric sea level change (0–2000 m), 1955–2010**. Geophysical Research Letters, Washington, v. 39, n. 10, L10603, 2012.

LIANG, T.-Y. *et al.* **Accelerated Ocean thermal expansion and its contribution to Global Sea-level rise**. Journal of Sea Research, v. 205, p. 102589, 2025.

LIMA, C. C. de. **Identification and evaluation of urban flooding zones in the city of Natal, Northeast Brazil, with the support of geotechnologies**. 2019. Dissertation (Master's Degree in Civil Engineering) – Federal University of Rio Grande do Norte, Natal, 2019.

LIMA, C. C. de *et al.* **Identification and Evaluation of Urban Flooding Zones, with the Support of Geotechnologies, in the City of Natal, Northeast Brazil**. Yearbook of the Institute of Geosciences - UFRJ, Rio de Janeiro, v. 42, n. 2, p. 378-394, 2019.

LIU, J. *et al.* **Increasing wave power due to global climate change and intensification of Antarctic Oscillation**. Applied Energy, v. 358, p. 122572, 2024.

MACEDO, Y. M. *et al.* **Socio-environmental vulnerability on a detailed scale: the case of Mãe Luiza, Natal, RN, Brazil**. Geosaberes, Fortaleza, v. 6, n. 2, p. 145-157, 2015.

MATOS, M. F. A.; AMARO, V. E.; SCUDELARI, A. C.; ROSADO, S. B. **Estimates of long-term changes in the beach line of the Eastern Coast of Rio Grande do Norte, Northeast Brazil**. Revista Brasileira de Geomorfologia, [S. l.], v. 23, n. 1, jan./mar. 2022. doi: 10.20502/rbg.v23i1.1953.

MERCHANT, C. J.; ALLAN, R. P.; EMBURY, O. **Quantifying the acceleration of multidecadal global sea surface warming dri-**

**ven by Earth's energy imbalance**. Environmental Research Letters, [S. l.], v. 20, n. 2, p. 024037, 2025.

MOLION, L. C. B.; BERNARDO, S. O. **A review of the dynamics of rainfall in the Brazilian Northeast**. Revista Brasileira de Meteorologia, [S. l.], v. 17, n. 1, p. 1-10, 2002.

NATAL (RN). **Complementary Law No. 082**, of June 21, 2007. Establishes the Natal Master Plan and provides other provisions. Official Gazette of the Municipality, Natal, RN, June 2007.

NATAL (RN). **Complementary Law No. 208**, of November 01, 2022. Establishes the Natal Master Plan and provides other provisions. Official Gazette of the Municipality, Natal, RN, 01 nov. 2022.

NATAL (RN). **Law No. 7,801**, of December 23, 2024. Provides for the use and occupation of the land and establishes urban regulations for the Special Areas of Tourist and Landscape Interest - AEITPs, established by Complementary Law No. 208, of March 7, 2022, and provides for other provisions. Official Gazette of the Municipality, Natal, RN, 26 dez. 2024.

NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION (NASA). **Sea Level Rise**. [S. l.]: NASA, 2025. Available at: https://sealevel.nasa.gov/. Accessed on: 23 out. 2025.

PINHEIRO, L. R. S. G. *et al.* **40 Years Extreme Offshore Waves off the Eastern Continental Shelf of Rio Grande do Norte, Northeast Brazil**. Revista Brasileira de Geografia Física, v. 16, n. 2, p. 1040-1059, 2023.

REGUERO, B. G.; LOSADA, I. J.; MÉNDEZ, F. J. **A recent increase in global wave power as a consequence of oceanic warming**. Nature Communications, v. 10, n. 1, p. 205, 2019.

RIBEIRO, M. S. M. *et al.* **Intense Precipitation and Area of Risk: A Case Study of Mass Movement in the City of Natal, Brazil**. Water, Basel, v. 13, n. 23, p. 3346, 2021.

SAENGSUPAVANICH, C. *et al.* **Jeopardizing the environment with beach nourishment**. Science of the Total Environment, v. 868, p. 161485, 2023.

SCHOONEES, T., *et al.* **Hard Structures for Coastal Protection, Towards Greener Designs**. Estuaries and Coasts, v. 42, p. 1709–1729, 2019. DOI: 10.1007/s12237-019-00551-z.

SCHWARTZ, S. E. **Heat capacity, time constant, and sensitivity of Earth's climate system**. Journal of Geophysical Research, v. 112, D24S05, 2007.

GEOLOGICAL SURVEY OF BRAZIL (CPRM). **Geological-geotechnical evaluation of the landslide in the Mãe Luíza neighborhood, municipality of Natal - RN**. Recife: CPRM, 2014. Technical Report. Available at: https://rigeo.cprm.gov.br/jspui/handle/doc/15089. Accessed on: 23 out. 2025.

TETRA TECH. **Environmental Impact Study (EIA) and Environmental Impact Report (EIR) of the Ponta Negra Beach Fattening Project**. Christmas: Tetra Tech, 2022.

TORRES, R. R.; FERREIRA, N. J. **Case Studies of Easterly Wave Disturbances over Northeast Brazil Using the Eta Model**. Weather and Forecasting, v. 26, n. 2, p. 225-238, 2011.

TRIBUNA DO NORTE. **Ponta Negra fattening: experts point out the need for maintenance. Tribuna do Norte, Natal, RN, June 24, 2024**. Available at: https://www.tribunadonorte.com.br/noticia/engorda-de-ponta-negra-especialistas--apontam-necessidade-de-manutencao/591557. Accessed on: 23 out. 2025.

VAN DER MEULEN, F.; IJFF, S.; VAN ZETTEN, R. **Nature-based solutions for coastal adaptation management, concepts and scope, an overview**. Nordic Journal of Botany, [S. l.], v. 2023, n. 1, p. e03290, 2022.

WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION (WMO). **State of the Global Climate 2024**. Geneva: WMO, 2025. (WMO-No. 1368). Available at: https://wmo.int/publication-series/state-of--global-climate-2024. Accessed on: 23 out. 2025.

# PARTE III

## IMPACTOS SISTÊMICOS ENTRE INFRAESTRUTURA E AS CIDADES

# PART III

## SYSTEMIC IMPACTS BETWEEN INFRASTRUCTURE AND CITIES

7

# INFRAESTRUTURA FERROVIÁRIA E AS DINÂMICAS URBANAS E REGIONAIS: IMPACTOS, CONFLITOS E TRANSFORMAÇÕES TERRITORIAIS

BEATRIZ KOPPERSCHMIDT DE OLIVEIRA

## RESUMO

O sistema ferroviário do interior paulista passou por reconfigurações marcadas por mudanças econômicas, políticas e institucionais, gerando conflitos entre a ferrovia e o tecido urbano. As ferrovias, antes articuladoras do território e do crescimento urbano, hoje operam principalmente sob lógica privada, voltada ao transporte de commodities, desvinculando-se das dinâmicas locais. Isso acarreta segregações socioespaciais, conflitos fundiários, descaracterização patrimonial e barreiras físicas nas cidades. A lógica atual fragmenta o sistema ferroviário, tornando-o um corredor logístico excludente. Por outro lado, as cidades impactam as ferrovias, ao ocupar irregularmente suas margens, ou ao propor requalificações alinhadas a interesses imobiliários. Há falta de integração entre os planejamentos federal, estadual e municipal, dificultando soluções, especialmente em um momento de intensificação dos impactos das mudanças climáticas. A proposta do Regional Design surge como alternativa integradora, propondo a ferrovia como infraestrutura multifuncional e capaz de promover a integração territorial. Assim, a ferrovia tem o potencial de se tornar um vetor de transformação urbana e regional, mas isso exige uma governança articulada e o planejamento multiescalar.

**Palavras-chave:**

Infraestrutura ferroviária; planejamento; mudanças climáticas

## INTRODUÇÃO

As infraestruturas ferroviárias exerceram influência direta e indireta no desenvolvimento urbano e regional no Brasil, particularmente no estado de São Paulo. Ao longo dos séculos XIX e XX, as ferrovias não só facilitaram o transporte de pessoas e mercadorias, mas também moldaram a organização espacial das cidades, criando novas centralidades e estimulando o crescimento econômico. No entanto, com a evolução das demandas econômicas e o surgimento de novas infraestruturas, como as rodovias, as ferrovias perderam seu protagonismo inicial, tornando-se mais voltadas para o transporte de commodities e menos integradas ao tecido urbano.

Nesse contexto, o estudo das ferrovias no interior paulista destaca a complexa interação entre infraestrutura e dinâmica urbana, revelando tanto oportunidades quanto desafios. Embora as ferrovias tenham promovido o desenvolvimento econômico e a urbanização, elas também criaram barreiras físicas e sociais dentro das cidades, contribuindo para a segregação espacial e apresentando conflitos de uso que persistem até hoje. A refuncionalização e a integração dessas infraestruturas ao planejamento urbano contemporâneo representam, portanto, uma oportunidade para melhorar a coesão urbana e a sustentabilidade regional, exigindo uma abordagem coordenada entre os diferentes níveis de governo.

Para compreender esse processo em profundidade, é fundamental considerar que a infraestrutura ferroviária brasileira atual é resultado de hegemonias históricas. Inicialmente, as companhias foram criadas por empresas de capital privado, voltadas para atender seus próprios interesses. Posteriormente, houve a unificação dessas companhias sob a administração do Governo Federal, por meio da Rede Ferroviária Federal S.A. (RFFSA). Mais tarde, a operação das ferrovias passou a ser controlada por grandes empresas, que atuam predominantemente para atender às demandas do mercado.

Essa trajetória histórica evidencia como as infraestruturas se tornaram os principais ativos físicos e tecnológicos das cidades modernas (Graham; Marvin, 2001), embora seja recorrente a ocorrência de conflitos entre os sistemas de infraestrutura e o tecido urbano. A construção de espaços de mobilidade e fluxo para

alguns frequentemente implica na criação de barreiras para outros (Graham; Marvin, 2001), sendo essa uma questão central da relação entre a ferrovia e a cidade, ambos inseridos em dinâmicas regionais.

Os resultados do estudo realizado em seis cidades do interior paulista reforçam essa perspectiva, ao demonstrar que os processos que envolvem a ferrovia — uma infraestrutura regional — não ocorrem isoladamente, em uma única cidade. Pelo contrário, manifestam-se em sistemas de cidades, com diferentes escalas, formas e temporalidades, evidenciando tanto inconsistências quanto permanências sistêmicas.

Além disso, os sistemas de infraestrutura estão profundamente ligados a processos sociotécnicos, políticos e culturais mais amplos, que possuem efeitos incertos em distintos lugares e tempos. Como observam Graham e Marvin (2001), as infraestruturas podem fragmentar a experiência urbana, e essa fragmentação torna-se ainda mais evidente diante das novas dinâmicas urbanas e regionais. No caso das ferrovias paulistas, verifica-se a intensificação do desenvolvimento desigual das infraestruturas regionais, em que espaços fisicamente próximos podem apresentar relações e trocas menos intensas do que locais distantes entre si.

Diante disso, as organizações territoriais, especialmente nas regiões metropolitanas, apontam para a necessidade de novas estratégias espaciais e escalas de planejamento (Neuman; Zonneveld, 2021). As condições emergentes da globalização, das mudanças climáticas e do crescimento de sistemas de cidades de médio porte demandam articulações mais eficazes de mobilidade e conectividade, nas quais as infraestruturas desempenham um papel estruturador.

## 1. INFRAESTRUTURA EM DISPUTA: MUDANÇAS NO SISTEMA FERROVIÁRIO E SEUS EFEITOS SOBRE O TERRITÓRIO URBANO

Embora no Brasil não haja consenso sobre a definição de infraestrutura (IPEA, 2010) e, principalmente, sobre a dimensão escalar de seus impactos, para a presente análise considera-se a infraestrutura sobre três aspectos: relacionada a um sistema de

serviços, em geral; público e composto por redes técnicas (Oxford, 2024), como um suporte invisível, material ou imaterial, indispensável para uma estrutura concreta ou abstrata edificada ou social; e como base da organização social (jurídica, cultural, política), pela constituição de um conjunto de relações econômicas de produção (Glass; Addie; Nelles, 2019).

Ou seja: a infraestrutura pode ser entendida como o sistema técnico de equipamentos e serviços necessários ao desenvolvimento das funções urbanas e, também, como funcionalidades que envolvem os aspectos social, econômico e institucional (Zmitrowicz, 1997). Sua incidência ocorre no território e, especialmente, na cidade, sua abrangência nem sempre se restringe aos seus limites porque, independentemente de sua natureza, está conectada a sistemas maiores. Mesmo incidindo sobre a cidade, sua extensão é mais ampla que os limites municipais, interligando-se a condicionantes ambientais ou técnicas. Inclusive em relação à sua funcionalidade, a abrangência da infraestrutura extrapola funções locais e corresponde a vínculos regionais, nacionais e até globais.

Estudos recentes retomam o interesse nas infraestruturas associadas a cidades em rede (Regional Studies Association, 2024) e buscam evidenciar como a infraestrutura interfere no cotidiano, na governança e no desenvolvimento em âmbito local e regional, por influências recíprocas. Também demonstram como os investimentos (ou suas ausências) revelam elementos materiais e discursivos que produzem, estruturam e modificam as cidades articuladas sistemicamente com alcances regionais.

As crises fiscais e políticas das décadas de 1970 e 1980 impulsionaram a adoção de políticas neoliberais, voltadas à redução da atuação estatal. Nesse contexto, a RFFSA foi incluída no Programa Nacional de Desestatização, em 1992, e, entre 1996 e 1998, suas operações de transporte de cargas foram concedidas à iniciativa privada. Em 1998, a FEPASA foi incorporada à RFFSA, sendo também desestatizada em seguida. O sistema ferroviário foi segmentado em seis malhas regionais e concedido a empresas privadas, enquanto o patrimônio não operacional — como estações, armazéns e edifícios administrativos — permaneceu sob domínio da

União. Essa separação marcou o início de uma gestão fragmentada da malha ferroviária e de seus bens, alterando significativamente a relação entre as ferrovias e os sistemas urbanos, que, embora ainda existentes, passaram a se reconfigurar sob outras lógicas e formas de articulação.

Portanto, é importante mencionar que a infraestrutura ferroviária não foi abandonada, mas se adaptou ao contexto econômico e político, alterando a forma como funciona por meio de um novo modelo de negócio. As novas técnicas e tecnologias alteraram tanto o funcionamento quanto a relação com os complexos ferroviários. Essa divisão marca, também, o início de uma gestão fragmentada das linhas ferroviárias e do próprio patrimônio e, em ambos os casos, da relação com as cidades. Se antes havia uma indução à formação de sistemas de cidades pelas linhas ferroviárias, esses sistemas não deixam de existir, mas passam a fazer parte de outras relações, distintas daquelas derivadas da sua formação.

Desde 1996, o modelo vigente permitia às empresas privadas operarem trechos existentes de ferrovias e, mediante concorrência em processos conduzidos pelo Governo, construir novas linhas, seguindo o planejamento e as condições definidas pelo poder público. Com a recente aprovação da Lei das Ferrovias, em conjunto com a Lei 13.448/2017, surgiu o debate sobre a implementação e operação de *shortlines* no Brasil.

*Shortlines* são ferrovias de pequeno e médio porte (classes II e III), que atuam principalmente em nível local, complementando as ferrovias de abrangência nacional ou internacional (classe I), ou mesmo operando de forma independente (Lanza, 2020; Dalto *et al.*, 2023). Esse modelo é inspirado no caso norte-americano, onde as *shortlines* se expandiram significativamente após a promulgação do *Staggers Rail Act* em 1980, que flexibilizou a regulamentação e permitiu a atuação regional e local, muitas vezes em colaboração com linhas principais (Dalto *et al.*, 2023). Estudos realizados pelo programa COPPE (Pesquisa e Desenvolvimento em Engenharia Ferroviária) apontam que a conformação da malha atual inviabiliza que sejam incorporadas outras mercadorias, entre outros fatores, pela carência e até ausência de terminais intermodais (Donato *et al.*, 2022).

Dessa forma, as ferrovias funcionam basicamente como longos corredores, que conectam as principais empresas mineradoras e os grandes produtores agrícolas diretamente aos portos, prejudicando o funcionamento da ferrovia como modal de transporte diversificado, não incluindo o serviço de pequeno porte de cargas gerais.

Além disso, esse modelo pode gerar impacto ambiental devido aos riscos de acidentes e contaminação; impacto fundiário na valorização imobiliária, que incide sobre o planejamento de municípios; conflitos nas áreas de remoções; e a configuração de obstáculos e atratividades. Ou seja: esse modelo, importado para a realidade brasileira, fragmenta o transporte, que já é concebido de forma fragmentada, do ponto de vista territorial.

As relações regionais que surgiram a partir das ferrovias se transformaram, algumas se fortalecendo e outras se desfazendo. A partir do estudo de seis cidades distintas do interior paulista (Araraquara, Ribeirão Preto, São Carlos, Rio Claro, Cordeirópolis e Casa Branca), que têm em comum a presença da ferrovia, foram evidenciadas incompatibilidades e fragilidades que se apresentam sistematicamente nas cidades, conformando um sistema de cidades que não mais têm a linearidade dos trilhos como elemento de ligação, mas sim as relações conflituosas e os conflitos que estabelecem nos tecidos urbanos, demonstrados no quadro abaixo.

As seis cidades foram selecionadas para serem estudadas considerando os impactos e transformações da ferrovia no tecido urbano. A diferença entre as cidades foi um fator fundamental para a escolha, compreendendo que trariam particularidades ao olhar para o mesmo objeto de estudo (as ferrovias e o território). Buscou-se identificar proximidades e divergências ao olhar para o sistema de cidades, em que as relações regionais possuem desdobramentos nas dinâmicas locais, em algumas situações de forma isolada, mas em outras envolvendo todo o sistema.

Cordeirópolis e Casa Branca são cidades de pequeno porte, localizadas nos trechos das antigas linhas Paulista e Mogiana, respectivamente, apresentando situações distintas de implantação e transformação da malha ferroviária.

São Carlos e Araraquara, cidades médias com desenvolvimento associado ao ciclo cafeeiro, compartilham uma infraestrutura ferroviária estruturadora do território desde sua implantação, mas com relações distintas com o território urbano. São Carlos foi marcada pelo colapso de parte da ferrovia em eventos de chuva extrema, enquanto Araraquara enfrenta recorrentes emergências climáticas, o que evidencia a vulnerabilidade dessas infraestruturas frente às mudanças ambientais. Ambas são polos da Região Administrativa Central, com funções complementares e visões de planejamento distintas.

Rio Claro foi incorporada por sua relevância histórica e atual no sistema ferroviário. A cidade abriga oficinas de manutenção ainda em funcionamento em sua região central, sendo fundamental para entender os impactos da permanência da ferrovia na dinâmica urbana. Sua localização estratégica, próxima ao Polo Cerâmico de Santa Gertrudes e à Região Metropolitana de Piracicaba, amplia o interesse territorial e regional do estudo.

Ribeirão Preto, cidade de grande porte e sede de uma região metropolitana, foi incluída por sua importância logística, reunindo diferentes modais e sendo central para o entendimento das conexões infraestruturais mais amplas. Sua escolha permite analisar os impactos da ferrovia em uma cidade que exerce forte influência sobre a organização regional e os fluxos econômicos.

Em um primeiro momento, a configuração de sistemas de cidades estava intrinsecamente ligada ao desenvolvimento das companhias ferroviárias e das atividades produtivas agrícolas. Essas companhias desempenharam um papel fundamental na formação e no desenvolvimento das cidades, estabelecendo um sistema que se articulava linearmente. Esse sistema era caracterizado, entre outros aspectos, pela conexão linear do modal ferroviário, pelas atividades produtivas comuns e meios de vida e serviços compartilhados.

A integração entre as cidades dentro de um mesmo tronco ferroviário era garantida pela ferrovia, que funcionava como um elo essencial para o desenvolvimento econômico e social dessas localidades. Logo, foram evidenciados sistemas de cidades que,

em um primeiro momento, se conformaram ao longo das duas linhas ferroviárias, constituindo sistemas distintos. No entanto, as cidades ao longo das linhas ferroviárias não são mais entendidas como sistemas separados pelas companhias ferroviárias, mas sim como um sistema de cidades conformado pelos conflitos e pelas permanências.

Com o processo de ascensão das rodovias e refuncionalização das ferrovias, as rodovias passaram a ser o principal meio de transporte, enquanto as ferrovias foram adaptadas para atender a novas demandas, muitas vezes focando no transporte de carga e de longa distância. No contexto atual, são evidentes os conflitos e incompatibilidades urbanas, em que a relação entre as áreas urbanizadas e as ferrovias é complexa, marcada por conflitos de interesses e incompatibilidades. As cidades passaram a enfrentar desafios comuns, como a integração das ferrovias nos centros urbanos e a gestão dos impactos ambientais e sociais associados a elas. O sistema de cidades constituído pela infraestrutura de transporte se transforma, então, a partir de sua obsolescência, apresentando outras características e conformando sistemas de incompatibilidades e conflitos.

A análise das cidades de Cordeirópolis, Rio Claro, São Carlos, Araraquara, Casa Branca e Ribeirão Preto permitiu identificar problemas urbanos sistêmicos nas relações entre ferrovia e tecido urbano, mas com manifestações distintas em cada território. A análise, sintetizada na Figura 1, foi construída a partir da revisão histórica das implantações, leitura da morfologia urbana, consulta a documentos técnicos e visitas de campo. Entre os problemas identificados, estão conflitos entre infraestruturas, riscos associados às travessias, incompatibilidades entre usos do entorno, ocupações irregulares em terras da União, insegurança jurídica, vulnerabilidade socioambiental e agravamento dos impactos climáticos. Somam-se, também, à descaracterização do patrimônio ferroviário, evidente em imóveis abandonados ou sem uso, e à presença de linhas desativadas ocupadas irregularmente ou convertidas em vazios urbanos.

| TEMA | CORDEIRÓPOLIS | RIO CLARO | SÃO CARLOS | ARARAQUARA | CASA BRANCA | RIBEIRÃO PRETO |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Sobreposição de infraestruturas | X | X | X | X | X | X |
| Questão fundiária (habitações em terras da União, áreas non *aedificandi*, conflitos) | X | X | X | X | X | X |
| Descaracterização do patrimônio ferroviário | X | X | X | X | X | X |
| Questões socioambientais (impactos ambientais e relação com entorno) | X | X | X | X | X | X |
| Conflitos com travessia de pedestres e insegurança | X | X | X | X | | X |
| Conflitos com drenagem urbana | X | X | X | | X | X |
| Formação de barreiras | X | X | X | X | | X |
| Segregação socioeconômica | X | X | X | X | | X |
| Impactos das mudanças climáticas e urbanização | X | X | X | X | | X |
| Relação conflituosa com a infraestrutura (usos do entorno) | X | X | X | | | X |
| Perigos pela proximidade da linha férrea | X | X | X | | | |
| Linhas desativadas sem ocupação | | X | | X | | X |
| Linhas desativadas com ocupações irregulares | | | | | X | X |

**Figura 01:** Incompatibilidades da relação entre a ferrovia e o tecido urbano identificados nas cidades de Cordeirópolis, Rio Claro, São Claro, Araraquara, Casa Branca e Ribeirão Preto. *Fonte: Elaborado pela autora, 2024.*

Embora representem interferências significativas, que demandam planejamento, investimentos e articulações institucionais — gerando novos conflitos —, as ferrovias também preservam valores positivos ligados à memória, ao patrimônio e ao potencial de infraestrutura urbana existente. Esses aspectos, contudo, são frequentemente apagados pelos desafios que a infraestrutura acumula no território.

## 2. PROBLEMAS URBANOS ASSOCIADOS À FERROVIA: MANIFESTAÇÕES LOCAIS DE UM SISTEMA REGIONAL

A presença da infraestrutura ferroviária no tecido urbano das cidades do interior paulista gera uma série de conflitos e desafios, conforme evidenciado na Figura 01. No entanto, elas se manifestam de formas distintas conforme o contexto local. Entre os principais problemas observados, destacam-se os conflitos com outras infraestruturas urbanas, especialmente o sistema viário; a criação de barreiras físicas e sociais que contribuem para a segregação socioespacial; a existência de passagens em nível que geram riscos à segurança; a ocupação irregular de áreas ao longo das linhas férreas, tanto ativas quanto desativadas; e os conflitos fundiários envolvendo terras da União. Somam-se a esses aspectos a vulnerabilidade das infraestruturas frente aos impactos das mudanças climáticas, que afetam tanto a ferrovia quanto a cidade, e a descaracterização do patrimônio ferroviário, frequentemente degradado ou abandonado após a desativação de trechos.

Esses elementos evidenciam a complexidade da relação entre a ferrovia e a cidade contemporânea, marcada por tensões entre escalas regionais e locais e pela necessidade urgente de estratégias de reconexão, preservação e planejamento integrado. A partir desses problemas, o estudo analisa como esses conflitos se materializam nas seis cidades observadas, revelando tanto recorrências quanto singularidades em suas dinâmicas urbanas e territoriais.

A coexistência entre a ferrovia e outros sistemas urbanos, como o viário, exige a implementação de diversas soluções locais para integrar os trilhos ao espaço urbano. Em Rio Claro e São Carlos, a presença de passagens em nível no centro da cidade representa um risco constante para a população e compromete a fluidez do tráfego urbano. Em Cordeirópolis, a ausência de obras de transposição e o desnível entre os trilhos e a área central resultam em travessias improvisadas, com circulação intensa de pedestres e ciclistas sobre os trilhos, aumentando os riscos de acidentes.

**Figura 02:** Conflitos da sobreposição de diferentes infraestruturas em Rio Claro. *Fonte autoria própria, 2023.*

A ferrovia também se consolidou como barreira física e social, reforçando desigualdades preexistentes. Em Araraquara, sua implantação em formato de cinturão acentuou a separação entre a área central verticalizada e a Vila Xavier, marcada por menor renda e infraestrutura urbana mais precária, inicialmente ocupada pelos ferroviários e suas famílias.

Em Ribeirão Preto, a ferrovia, combinada a outras infraestruturas regionais, demarca limites entre habitações vulneráveis e condomínios fechados. Situações semelhantes ocorrem em Rio Claro, São Carlos e Cordeirópolis, onde conjuntos habitacionais de interesse social, loteamentos informais e antigas vilas ferroviárias concentram-se de um lado dos trilhos, em contraste com áreas de maior renda, do outro. Ainda que a segregação seja um processo mais amplo, a ferrovia territorializa e intensifica seus efeitos.

A falta de integração adequada entre a ferrovia e a cidade se manifesta também em travessias informais. Em Cordeirópolis, famílias que vivem próximas aos trilhos utilizam diariamente as margens da ferrovia, expondo-se a riscos, enquanto em Rio Claro e São Carlos o tráfego ferroviário ativo em áreas centrais intensifica conflitos. Concessionárias têm instalado gradis e muros para restringir acessos, reduzindo riscos, mas reforçando a fragmentação urbana.

**Figura 03:** Conflitos da sobreposição de diferentes infraestruturas em São Carlos. *Fonte autoria própria, 2023.*

Em Ribeirão Preto, destaca-se a Ocupação Cidade Locomotiva, com mais de 300 famílias em situação de vulnerabilidade socioambiental junto à ferrovia e próxima ao aeroporto. Em Cordeirópolis, foram identificadas construções precárias entre o córrego Tatu e os trilhos, algumas dentro da faixa *non aedificandi*. Ocupações semelhantes existem em São Carlos e Casa Branca. Nos trechos desativados de Ribeirão Preto e Casa Branca, essas ocupações continuam a crescer, agravando conflitos fundiários e ambientais.

**Figura 04:** Ocupação Cidade Locomotiva, ao longo dos trilhos da ferrovia em Ribeirão Preto. *Fonte: LabCidade, 2020.*

A desativação de trechos ferroviários, frequentemente vista como solução para mitigar impactos negativos, tem gerado novos desafios urbanos. Em Rio Claro e Ribeirão Preto, áreas antes ocupadas por trilhos foram abandonadas ou irregularmente ocupadas, tornando-se vazios urbanos degradados e focos de insegurança e descarte de resíduos. Em Araraquara e Rio Claro, mesmo com contornos ferroviários desviando parte do fluxo, oficinas e estruturas ainda operam em áreas centrais e motivam debates sobre seu futuro. Em Rio Claro, projeta-se a transformação da faixa ferroviária em vias expressas, alinhada à lógica imobiliária; em Araraquara, busca-se valorizar as áreas por seus valores ambientais e patrimoniais, propondo um Parque Ferroviário que integre drenagem, mobilidade e cultura.

**Figura 05:** Complexo ferroviário em Araraquara. *Fonte autoria própria, 2023.*

As infraestruturas ferroviárias também são vulneráveis a eventos climáticos extremos, intensificados pela urbanização e pelas mudanças ambientais. Graham (2010) descreve a infraestrutura como "cola silenciosa", e mostra que sua ruptura evidencia fragilidades sistêmicas. O caso mais significativo foi o colapso da infraestrutura ferroviária em São Carlos (2022). A linha, implantada sobre as cumeeiras e sobre o Córrego do Monjolinho, possuía dispositivos de transposição subdimensionados para o crescimento urbano e para o aumento dos eventos extremos. As chuvas intensas resultaram em colapso, gerando danos econômicos amplos, com prejuízos na cadeia produtiva nacional de grãos e riscos à população, que poderiam ter sido mitigados com adequações prévias.

**Figura 06:** Colapso da infraestrutura ferroviária em São Carlos. *Fonte: G1, acesso em 24 de junho 2023.*

A decisão técnica sobre o local e o traçado da implantação da ferrovia se torna fundamental para compreender os impactos e a relação com o entorno, especialmente com a intensificação dos impactos das mudanças climáticas. Nas cidades onde o traçado segue o fundo de vale, como Cordeirópolis e Araraquara, os trilhos e suas áreas *non aedificandi* funcionam como importantes espaços permeáveis, fundamentais para a drenagem urbana. Ainda assim, conflitos entre a ferrovia e o sistema de drenagem são recorrentes. A ferrovia, como estrutura linear fixa, exige obras complementares — e muitas vezes improvisadas — para controle dos fluxos d'água, como a escada hidráulica construída em Cordeirópolis. Os trilhos também são margeados por ocupações vulneráveis, com acúmulo de lixo e resíduos que obstruem dispositivos de drenagem, agravando enchentes e riscos sanitários.

**Figura 07:** Escada hidráulica próxima aos trilhos em Cordeirópolis.
*Fonte autoria própria, 2023.*

**Figura 08:** Problemas socioambientais próximos aos trilhos ativos em Ribeirão Preto. *Fonte: Autoria própria 2023.*

A análise revela que, embora a ferrovia tenha perdido centralidade como articuladora urbana, com a ascensão das rodovias, ela permanece estruturando o território e marcando o cotidiano urbano — como barreira, memória, conflito ou oportunidade. Assim, a formação de sistemas de cidades a partir da ferrovia implicou problemas sistêmicos derivados dos padrões de ocupação e expansão urbana associados à infraestrutura. Esses desafios se reproduzem de forma homogênea entre os municípios estudados, ainda que com particularidades locais.

## 3. RECONFIGURAÇÃO FERROVIÁRIA E PLANEJAMENTO TERRITORIAL: DESAFIOS MULTIESCALARES

As cidades analisadas apresentam respostas distintas à presença da ferrovia, de acordo com porte, capacidades institucionais e modelos de planejamento. Em cidades pequenas, como Cordeirópolis e Casa Branca, predominam dificuldades de regularização fundiária, limitações técnicas e financeiras e baixa articulação com a concessionária ferroviária. Embora historicamente centrais para seu desenvolvimento, as ferrovias hoje exercem pouca influência sobre a dinâmica urbana, seja por localização periférica (como o contorno de Casa Branca), seja pelo descolamento de suas funções atuais, voltadas majoritariamente ao transporte de commodities. As iniciativas de requalificação esbarram em entraves burocráticos e na ausência de canais de diálogo com os agentes operacionais.

Nas cidades médias — como São Carlos, Araraquara e Rio Claro — observa-se atuação mais ativa, ainda que frequentemente alinhada ao mercado imobiliário e ao planejamento funcionalista do século XX. Em Rio Claro, a desativação das atividades ferroviárias centrais é tratada como oportunidade imobiliária, por meio de uma Zona de Operações Urbanas Consorciadas (Rio Claro, 2016) potencialmente transformadora da paisagem urbana, mas que desconsidera os potenciais culturais, sociais, patrimoniais e ambientais da ferrovia, além das áreas permeáveis centrais relevantes diante das mudanças climáticas. Nesse modelo, a ferrovia é vista como obstáculo ao crescimento, e não como ativo urbano.

Araraquara adota abordagem contrastante. Apesar de também projetar a retirada das operações centrais, propõe preservar a Orla Ferroviária, integrando seus valores ambientais, históricos e sociais ao planejamento urbano (Araraquara, 2019). A proposta articula ajustes viários e requalificação do entorno, numa lógica sistêmica e patrimonial, aproximando-se de concepções urbanísticas que reconhecem a multifuncionalidade das infraestruturas ferroviárias.

Nas cidades maiores, como Ribeirão Preto, prevalece um distanciamento completo entre ferrovia e planejamento local, restringindo-a à função logística (Ribeirão Preto, 2019). A ferrovia torna-se

elemento técnico e setorial, sem integração com políticas de mobilidade, desenvolvimento urbano ou patrimônio. Essa desarticulação reflete um processo de apagamento da ferrovia no imaginário urbano, mesmo quando sua presença física persiste no território.

De modo geral, é possível identificar três padrões de abordagem nos municípios analisados. Nas cidades de pequeno porte, predomina a ausência de estratégias específicas, com forte dependência da ação da concessionária e limitação da capacidade técnica e institucional local. Nos municípios de médio porte, surgem modelos contrastantes: de um lado, abordagens mercadológicas e setoriais que tratam a ferrovia como obstáculo ao crescimento (como em Rio Claro); de outro, propostas integradoras e patrimoniais que reconhecem a ferrovia como ativo urbano (como em Araraquara). Já nas cidades maiores, observa-se uma tendência de afastamento completo da ferrovia do planejamento local, com priorização da sua função logística e negligenciamento de seus impactos urbanos e seu potencial de articulação territorial.

O Estado de São Paulo projeta investimentos em transporte ferroviário de passageiros, como os Trens Intercidades (TICs), visando reequilibrar a matriz de transportes e integrar cidades médias e grandes. A reintrodução do transporte ferroviário regional de passageiros surge como resposta às pressões por mobilidade mais sustentável e à necessidade de articular cidades médias e grandes em corredores eficientes.

A implantação de novas linhas ou a requalificação de trechos existentes, especialmente em áreas urbanizadas, envolve processos de desapropriação e remoções, emissão de ruído e poluição atmosférica, além de conflitos com o sistema viário e as comunidades do entorno. Impactos indiretos também precisam ser considerados, como o potencial de segregação socioespacial entre os lados dos trilhos, o surgimento de novos eixos de expansão urbana e as alterações na infraestrutura de drenagem urbana dos municípios.

Além disso, os projetos propostos priorizam a consolidação de eixos de desenvolvimento já existentes no estado, ao concentrarem maior infraestrutura, investimentos e fluxos, e assim reproduzirem o modelo de polos e eixos que levou a um padrão de urbanização no estado de São Paulo e proporcionou as condições

para a reestruturação produtiva (Tavares, 2018), com intensos desequilíbrios territoriais. No entanto, essa estrutura, que concentra o crescimento nos polos e ao longo dos eixos, não propõe levar o desenvolvimento para outras regiões, e a retomada desse modelo de planejamento regional pode intensificar a desigualdade regional.

No âmbito federal, existem diversas ações, planos e diretrizes para o setor das infraestruturas. Nos últimos anos, as ações do Governo Federal buscam alinhar e orientar o desenvolvimento de planos e projetos voltados para a conformação de um setor de transportes mais eficiente e sustentável, em um contexto de mobilização global para adoção de medidas de mitigação e adaptação às mudanças climáticas. Parcerias com instituições internacionais foram firmadas, como a parceria com a *Deutsche Gesellschaft fur Internationale Zusammenarbeit* (GIZ) para implementação do projeto ProAdapta. Parcerias foram feitas também com instituições de ensino superior e pesquisa nacionais.

Desde 2017, começaram as discussões sobre o modelo de contratos de concessões ferroviárias, impulsionadas pela Lei 13.448, que estabeleceu diretrizes para a prorrogação e relicitação dos contratos vigentes de 1996 a 1998, com duração de 30 anos. Durante o processo de renovação antecipada desses contratos, também surgiu o debate sobre a devolução à União de trechos ferroviários subutilizados, que não mais interessavam às concessionárias (Dalto *et al.*, 2023). Segundo dados da Agência Nacional de Transportes Terrestres (ANTT), aproximadamente 38,67% da malha ferroviária brasileira, totalizando 8.335,42 km, não são utilizados pelas concessionárias devido à baixa demanda e inviabilidade econômica.

Em 2018, a PLS 261 propôs um novo marco legal para as ferrovias, introduzindo a possibilidade de autorizações para exploração além das concessões. Transformada na Medida Provisória 1.065/2021 e na Lei 14.273/2021, conhecida como Lei das Ferrovias, a legislação transferiu a análise de novos trechos para a ANTT. Empresas como *China Communication Construction Company*, *Rumo*, *Russian Railways International*, *China Railway Corporation*, e um consórcio formado por *Amaggi*, *Dreyfus*, *Cargill*, *Bunge* e *ADM* demonstraram interesse em concessões importantes, como a Ferrovia Norte-Sul, Fiol e Ferrogrão (Aguiar, 2017; Fernandes, 2018).

O envolvimento crescente de capital internacional — como da *China Communication Construction Company*, *Russian Railways International* e de consórcios ligados ao agronegócio, frente a um fortalecimento da exportação de commodities agrícolas e expansão da fronteira agrícola — evidencia um cenário que favorece concessões orientadas por interesses privados (Aguiar, 2017; Fernandes, 2018). A combinação entre baixíssimos investimentos públicos e forte presença do capital estrangeiro amplia disputas por controle logístico e pode agravar fragmentações territoriais (Werner, 2020).

Embora o planejamento federal proponha diretrizes amplas, o incentivo a *shortlines* pode reforçar fragmentações, priorizando interesses locais e setoriais. As iniciativas recentes tendem a privilegiar sistemas conectados a redes internacionais de exportação, com limitada funcionalidade multimodal urbana. A ferrovia, como demonstrado neste estudo, conformou sistemas de cidades, consolidando eixos produtivos e urbanos; os novos investimentos podem transformar ou reforçar tais eixos, redefinindo relações regionais e produzindo novas permanências e conflitos.

No cenário global, houve uma intensificação da divisão internacional do trabalho no mundo globalizado, impactando diretamente a organização dos espaços regionais brasileiros, em especial após a alterações no contexto político brasileiro em 2016, com flexibilizações que facilitaram o controle de recursos estratégicos e aumentaram as disputas internacionais por concessões logísticas (Werner, 2020).

Vieira (2022), ao estudar o novo modelo de exploração ferroviária, destaca diferenças significativas entre os dois modelos. Ele aponta que o novo marco legal ainda apresenta lacunas e carece de discussões acadêmicas necessárias para desenvolver um modelo com regras claras. Inspirado pelo *Staggers Rail Act* de 1980, nos Estados Unidos, durante o auge do liberalismo econômico, o regime de autorizações brasileiro reflete influências estrangeiras. No entanto, as diferenças econômicas, políticas e sociais dificultam a aplicação direta desse modelo no contexto brasileiro, apesar de sua implementação em outros países, indicando a necessidade de mais estudos e análises específicos para o sistema ferroviário brasileiro (Acosta, 2022).

O planejamento federal, como demonstrado em iniciativas como o PNL 2035, busca exercer controle sobre a organização territorial por meio de projetos estratégicos em estudo. No entanto, a adoção do modelo de *shortlines* pode acabar favorecendo a fragmentação territorial. Embora o planejamento federal proponha um desenvolvimento mais amplo e integrado, o incentivo a essas linhas ferroviárias regionais e de menor escala, influenciado pela lógica neoliberal de produção, acaba priorizando interesses locais e setoriais, em detrimento de uma coesão territorial que fortaleça o país como um todo.

A abertura ao capital privado e internacional impõe desafios ao planejamento urbano e regional. Parcerias público-privadas tornam-se essenciais, mas requerem governança articulada entre as escalas municipal, regional e federal. A ausência dessa articulação — evidenciada pelos planos federais, estaduais e municipais — intensifica conflitos e fragiliza a gestão dos territórios ferroviários.

Assim, frente aos desafios do planejamento urbano-regional — especialmente quanto à interescalaridade, sustentabilidade e gestão territorial — destaca-se o Regional Design como abordagem capaz de integrar escalas, atores e estruturas regionais. Surgido nos Países Baixos e na Itália, o Regional Design afasta-se do planejamento regulatório tradicional, reconhecendo interconexões complexas entre lugares (Neuman; Zonneveld, 2021; Beloto, 2022). No contexto paulista, apresenta-se como instrumento promissor para compreender e orientar as transformações da relação entre ferrovia, cidades e sistemas territoriais.

Ao mapear estruturas regionais, articular atores públicos e privados, qualificar a ferrovia como infraestrutura multifuncional e promover governança colaborativa, o Regional Design contribui para superar a fragmentação histórica associada às ferrovias. A incorporação de ferramentas projetuais e cartográficas auxilia a visualização de cenários e a construção de pactos territoriais mais equitativos. Nessa perspectiva, a ferrovia pode ser reconduzida ao papel de articuladora — não de barreiras, mas dos fluxos, conexões e oportunidades territoriais, favorecendo uma transição mais justa, funcional e sustentável.

## 4. A EMERGÊNCIA DO REGIONAL DESIGN: A FERROVIA COMO VETOR E DESAFIO DO PLANEJAMENTO CONTEMPORÂNEO

As infraestruturas são os principais ativos físicos e tecnológicos das cidades modernas (Graham; Marvin, 2001), mas são recorrentes os conflitos entre os sistemas de infraestruturas e as cidades. A construção de espaços de mobilidade e fluxo para alguns envolve a construção de barreiras para outros (Graham; Marvin, 2001), sendo essa uma questão central da relação entre a ferrovia e o tecido urbano, ambos inseridos em dinâmicas regionais.

No caso das ferrovias paulistas, esses conflitos se expressam de modo semelhante em diferentes municípios: barreiras físicas, desigualdades socioespaciais, conflitos fundiários, riscos ambientais e ineficiências na articulação entre escalas de planejamento. Embora cada cidade apresente situações específicas, o conjunto das seis cidades estudadas demonstra que os processos ferroviários são, antes de tudo, regionais — e não isolados em cada município.

Os sistemas de infraestrutura estão ligados a processos sociotécnicos, políticos e culturais mais amplos, que possuem efeitos incertos em diferentes lugares e tempos, em que as infraestruturas podem fragmentar a experiência da cidade (Graham; Marvin, 2001). Devido às novas dinâmicas urbanas e regionais, com a intensificação do desenvolvimento desigual das infraestruturas regionais, que pode ser identificado nas ferrovias paulistas, os espaços fisicamente próximos podem ter relações e trocas menos intensas do que locais distantes fisicamente (Graham; Marvin, 2001).

As organizações territoriais, com destaque para as regiões metropolitanas, apontam para a necessidade de novas estratégias espaciais e escalas de planejamento (Neuman; Zonneveld, 2021). As novas condições, como a globalização, as mudanças climáticas e o crescimento de sistemas de cidades de médio porte necessitam de articulações para mobilidade e conectividade, em que as infraestruturas possuem papel estruturador.

A interlocução com gestores municipais demonstrou as dificuldades de implementar projetos ferroviários devido a disputas de

interesse, escassez de recursos e obstáculos de comunicação entre os entes federativos, acentuadas por inconsistências entre planos federais, estaduais e municipais. Embora planos federais recentes abordem mitigação e adaptação às mudanças climáticas com apoio de parcerias e estudos técnicos e o planejamento estadual enfatize integração territorial e crescimento econômico, o planejamento urbano local permanece condicionado às dinâmicas internas dos municípios e às limitações institucionais, muitas vezes em descompasso com ações de maior escala.

Nessa perspectiva, com os desafios do planejamento urbano e regional — especialmente quanto a interescalaridade dos lugares, o desenvolvimento sustentável e a gestão do território —, emergem novos métodos e conceitos. Assim, surge o Regional Design, que se distancia do planejamento regulatório, reconhecendo que espaços e lugares estão interconectados de várias maneiras, criando inter-relações complexas em diferentes escalas (Neuman; Zonneveld, 2021), levando em conta as estruturas regionais e os processos territoriais, buscando articular os atores públicos e privados (Beloto, 2022).

O Regional Design desponta como uma abordagem promissora para o planejamento regional brasileiro, ao permitir uma visão integrada das relações entre infraestrutura e desenvolvimento territorial. No interior paulista, a ferrovia moldou sistemas de cidades e deixou no território conflitos e rugosidades que persistem mesmo após mudanças profundas na cadeia produtiva e na lógica de operação ferroviária. Hoje, a ferrovia tende a reforçar padrões de fragmentação urbana e regional, ao mesmo tempo em que concentra investimentos e atrai infraestruturas, ampliando desigualdades, áreas de risco e impactos ambientais.

Apesar disso, a refuncionalização e a integração das ferrovias ao planejamento urbano representam oportunidades significativas para fortalecer a coesão territorial, desde que amparadas por governança articulada e visão multiescalar. O Regional Design contribui ao propor a requalificação da ferrovia como infraestrutura multifuncional, capaz de integrar logística, mobilidade, patrimônio, ecologia e usos urbanos, superando sua condição fragmentada atual. Essa abordagem também favorece a construção de visões compartilhadas de futuro e o alinhamento entre políticas federais,

estaduais e municipais, apoiando processos projetuais que tornam explícitas as relações regionais entre sistemas de cidades.

A fragmentação resultante das dinâmicas econômicas atuais tem favorecido a ruptura das infraestruturas e dos próprios sistemas de cidades organizados ao longo dessas infraestruturas, assim como proporcionado uma cadeia de conflitos similares nas cidades que permanecem com funções ferroviárias em seu tecido urbano. A ferrovia continua influenciando o uso do solo, atraindo outras infraestruturas e investimentos, mas também criando áreas de risco, ampliando a segregação e provocando impactos ambientais, porque suas funções mudaram e o contexto sobre o qual se insere também mudou. A ausência de planos que abordem esses conflitos colabora com a intensificação de suas consequências.

A infraestrutura reorganiza a estrutura e a morfologia de várias cidades ao longo do tempo, e as transformações de sua operacionalização — ao concretizarem as relações globais no ambiente urbano — materializam velhos e novos conflitos que requerem, por sua vez, novas formas de ação.

Diante das mudanças globais e dos desafios ambientais, um dos caminhos para o planejamento é a incorporação dos princípios do Regional Design para superar a fragmentação e os conflitos historicamente associados à infraestrutura ferroviária. Isso implica, primeiramente, a articulação entre escalas de planejamento, promovendo alinhamento entre planos federais, estaduais e municipais com base em visões de futuro construídas coletivamente. Envolve, também, o mapeamento das estruturas regionais e a identificação das relações entre os sistemas de cidades, com foco em conexões territoriais funcionais, e não apenas administrativas.

É necessário requalificar a ferrovia como infraestrutura multifuncional, reconhecendo seu potencial logístico, mas também paisagístico, patrimonial e ecológico. Ademais, deve-se fomentar a criação de espaços de governança colaborativa, nos quais os diversos agentes — governos, concessionárias, sociedade civil e iniciativa privada — possam cocriar soluções e pactuar responsabilidades. A utilização de ferramentas projetuais e cartográficas é fundamental, pois permitem visualizar cenários territoriais e testar arranjos espaciais que maximizem os benefícios da ferrovia para as cida-

des. Por fim, deve-se promover a equidade territorial, combatendo a reprodução de desigualdades por meio da distribuição seletiva de infraestrutura e priorizando investimentos em regiões periféricas aos grandes eixos logísticos.

O Regional Design, ao propor uma abordagem integradora, multidisciplinar e visual para o planejamento, oferece caminhos para repensar o papel da ferrovia como componente estruturador do território. Ele apresenta uma possibilidade de futuro em que as infraestruturas não sejam barreiras, mas articuladoras de fluxos, integrações e oportunidades, favorecendo uma transição territorial mais justa, funcional e sustentável.

## REFERÊNCIAS


ACOSTA, P. **Falta de investimento em infraestrutura compromete produtividade e competitividade do Brasil**. Folha de S. Paulo, 13 dez. 2022. Disponível em: https://www1.folha.uol.com.br/colunas/pablo-acosta/2022/12/falta-de-investimento-em-infraestrutura-compromete-produtividade-e-competitividade-do-brasil.shtml. Acesso em: 15 jun. 2024.

AGUIAR, D. **A geopolítica de infraestrutura da China na América do Sul: um estudo a partir do caso do Tapajós na Amazônia brasileira**. ActionAid; Federação de Órgãos para Assistência Social e Educacional, 2017.

ARARAQUARA. **Plano Diretor do Município de Araraquara**. Araraquara: Prefeitura Municipal, 2019.

ARAÚJO, T. B. de. **Brasil nos anos noventa: opções estratégicas e dinâmica regional**. Revista Brasileira de Estudos Urbanos e Regionais, [S. l.], n. 2, p. 9, 2000. DOI: 10.22296/2317-1529.2000n2p9. Disponível em: https://rbeur.anpur.org.br/rbeur/article/view/34. Acesso em: 24 jun. 2024.

BARBOSA, Benedito; FUNCK, Yan; UNGARETTI, Débora. **O que a Ocupação Cidade Locomotiva, em Ribeirão Preto, nos ensina em tempos de pandemia.** LABCIDADE, 16 de abril de 2020. Disponível em: http://www.labcidade.fau.usp.br/o-quea-o-

cupacao-cidade-loco_motiva-em-ribeirao-preto-nos-ensina-em-tempos-depandemia/. Acesso em: 15 jun. 2023.

BELOTO, Fabiana. **Regional Design no Brasil: articulação territorial e planejamento urbano-regional.** Revista Brasileira de Estudos Urbanos e Regionais, v. 24, n. 2, 2022.

BERNARDINI, Sidney Piochi. **Construindo infraestruturas, planejando territórios: a Secretaria de Agricultura, Comércio e Obras Públicas do Governo Estadual Paulista (1892 – 1926). 2007.** Tese (Doutorado) – Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Paulo.

CAMPOS, C. de. **Ferrovias e saneamento em São Paulo**. O engenheiro Antonio de Paula Souza da rede de infraestrutura territorial urbana paulista, 1870-1893. 2007. Tese (Doutorado em História e Fundamentos da Arquitetura e do Urbanismo) – Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Paulo. DOI: 10.11606/T.16.2007.t de-30112010-144111. Acesso em: 9 out. 2024.

CASA BRANCA. **Plano Diretor Participativo do Município de Casa Branca**. Casa Branca: Prefeitura Municipal, 2022.

CORDEIRÓPOLIS. **Plano Diretor Participativo do Município de Cordeirópolis**. Cordeirópolis: Prefeitura Municipal, 2018.

CORRÊA, Anna Maria Martinez. Araraquara, 1790-1930 – **Um Capítulo da História do Café em São Paulo.** Araraquara (SP): Acadêmica, 2008.

CORRÊA, Roberto Lobato. **O Espaço Urbano**. 3. ed. São Paulo: Editora Ática S.A, 1995.

DALTO, E. J.; SOUZA, N. T. P. de; PASSOS, P. dos. **Shortlines: o desafio de implantá-las no Brasil**. BNDES Setorial, n. 57, p. 5–71, 2023.

DONATO, M.; CERBINO, F.; SERACO, I.; RATTON NETO, H. X. **Diagnóstico do setor ferroviário brasileiro frente às expectativas com a renovação antecipada das concessões**. Conjecturas, v. 22, n. 1, p. 510–525, 2022. Disponível em: https://doi.org/10.53660/CONJ-512-707.

DONOSO, Verônica Garcia. **A paisagem e os sistemas de espaços livres na urbanização contemporânea do interior pau-**

**lista: estudo de caso da área entre São Carlos, Araraquara e Ribeirão Preto**. São Paulo, 2011.

FAYA JUNIOR, Silvio de Almeida. **Infraestrutura urbana e formação do território**. São Paulo: Edusp, 2020.

FERNANDES, A. Chinesa investe em porto no Maranhão e estuda ferrovias. Folha de S. Paulo, 19 mar. 2018. Disponível em: https://www1.folha.uol.com.br/mercado/2018/03/chinesa-investe-em-porto-nomaranhao-e-estuda-ferrovias.shtml. Acesso em: 13 jun. 2023.

GITEC/COPPE. **Contratação de serviços de consultoria para o levantamento de impactos e riscos climáticos sobre a infraestrutura federal de transportes terrestres (rodoviário e ferroviário) existente e projetada**. Produto 6 – Medidas de adaptação. 2022b

GLASS, M. R.; ADDIE, J. P. D.; NELLES, J. **Regional infrastructures, infrastructural regionalism.** Regional Studies, v. 53, n. 12, p. 1651-1656, 2019. Disponível em: https://doi.org/10.1080/00343404.2019.1667968. Acesso em: 18 de março de 2023.

GRAHAM, Stephen; MARVIN, Simon. **Splintering Urbanism: Networked infrastructures, technological mobilities and the urban condition**. London: Routledge, 2001.

GRANDI, G. **Café e expansão ferroviária: a Companhia E. F. Rio Claro**, 1880-1903. São Paulo: Annablume, 2007.

GUY, S.; GRAHAM, S.; MARVIN, S. **Privatized utilities and regional governance: new regional managers? Regional Studies**, v. 30, n. 8, p. 733-739, 1996. Disponível em: https://do i.org/10.1080/00343409612331350018. Acesso em: 23 de maio de 2024.

HILHORST, Jos G. M. [1973]. **Planejamento regional: enfoque sobre sistemas**. Tradução de Haydn Coutinho Pimenta. 2. ed. Rio de Janeiro: Zahar Editores, 1975

INSTITUTO DE PESQUISA ECONÔMICA APLICADA (IPEA); MORAIS, M. da P.; COSTA, M. A. (coords.). Infraestrutura social e urbana no Brasil: subsídios para uma agenda de pesquisa e formulação de políticas públicas. Brasília, DF: Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada, 2010.

LANZA, J. F. R. Ferrovias, mercados e políticas públicas: as shortlines como solução para o transporte ferroviário no Brasil. São Paulo: Labrador, 2020.

LENCIONI, Sandra. Região e Geografia. **A Noção de Região no Pensamento Geográfico**. In: Ana Fani Alessandri Carlos (Org.). Novos Caminhos da Geografia. São Paulo: Contexto, 1999, p. 187-204.

MAIA, Danielle Souza; SANTOS Y GANGES, Laura. **Espaço e memória: ferrovias e a constituição urbana.** In: SIMPÓSIO NACIONAL DE GEOGRAFIA URBANA, 2023, São Paulo. Anais... São Paulo: SBG, 2023.

MAIA, Doralice Sátyro; SANTOS Y GANGES, Luis. **História urbano-ferroviaria en algunas ciudades medianas brasileñas: diversas situaciones-tipo del efecto urbanístico de la estación en su crescimento y estructura urbana**. In: III Congreso de la Asociación Iberoamericana de Historia Urbana: Repensar la Ciudad Iberoamericana. Construir el pasado y diseñar el futuro, Mesa 44. Ciudad y ferrocarril: forma y estructura urbanas, 2023.

MAFRA, Nailton Silva Costa et al. **Aspectos de sustentabilidade no transporte ferroviário no Brasil no contexto da mudança climática**. 2022.

MARINHEIRO, Marco Antonio de Lima. **Análise setorial: o caso da privatização do modal ferroviário brasileiro.** Programa de Pós-Graduação em Ciências Econômicas da Faculdade de Ciências e Letras. UNESP, 2012.

MINISTÉRIO DOS TRANSPORTES. **Lei das Ferrovias é regulamentada: oportunidade de mais investimentos para o setor.** Publicado em 24 de outubro de 2022. Atualizado em 24 de outubro de 2022. Disponível em: https://www.gov.br/transportes/pt-br/assuntos/noticias/2022/10/lei-das-ferrovias-e-regulamentada-oportunidade-demais-investimentos-para-o-setor. Acesso em: 02 de agosto de 2023.

MINISTÉRIO DOS TRANSPORTES. **O novo marco regulatório das ferrovias brasileiras**. Publicado em 7 de abril de 2022. Atualizado em 20 de junho de 2023. Disponível em: https://

www.gov.br/transportes/pt-br/assuntos/conjur/o-novo--marco-regulatoriodas-ferrovias-brasileiras. Acesso em: 02 de agosto de 2023

MOURA JÚNIOR, Agnaldo Oliveira et al. **Railways from 1890 to 2016: a defragmented structure in Brazilian history**. Research, Society and Development, v. 7, n. 9, p. e1379442, 2018. DOI: 10.17648/rsd-v7i9.442. Disponível em: https://rsdjournal.org/index.php/rsd/article/view/442. Acesso em: 02 de outubro de 2022

NEUMAN, Michael; ZONNEVELD, Wil. **The resurgence of regional design**. European Planning Studies, v. 19, n. 10, p. 1621–1636, 2021.

PRADO JÚNIOR, Caio. **Formação do Brasil contemporâneo: colônia**. São Paulo: Brasiliense, 1956.

RIBEIRÃO PRETO. **Plano Diretor de Desenvolvimento Urbano e Ambiental de Ribeirão Preto.** Ribeirão Preto: Prefeitura Municipal, 2019.

RIO CLARO. **Plano Diretor Municipal de Rio Claro**. Rio Claro: Prefeitura Municipal, 2016.

SILVA, Guilherme Jonas Costa da; MARTINS, Humberto Eduardo de Paula; NEDER, Henrique Dantas. **Investimentos em infraestrutura de transportes e desigualdades regionais no Brasil: uma análise dos impactos do Programa de Aceleração do Crescimento (PAC).** Brazilian Journal of Political Economy, v. 36, n. 4, p. 840-863, out. 2016

SÃO CARLOS. **Plano Diretor do Município de São Carlos**. São Carlos: Prefeitura Municipal, 2018.

STEFANI, Carlos. **Ferrovia e cidade: a Companhia Paulista de Estradas de Ferro e o desenvolvimento urbano regional**. Campinas: PUC-Campinas, 2007.

STEINBERGER, Marília; BRUNA, Gilda Collet. **Cidades médias: elos do urbanoregional e do público-privado.** In: ANDRADE, Thompson Almeida; SERRA, Rodrigo Valente (orgs.). Cidades médias eiras. Rio de Janeiro: Ipea, 2001.

TAVARES, Jeferson Cristiano. **Infraestrutura na construção do território nacional, décadas de 1930 a 1970: arquitetura, urbanismo e as redes**. Oculum Ensaios, v. 17, p. 1-19, 2020. DOI: 10.24220/2318-0919v17e2020a4319. Disponível em: https://periodicos.puc-campinas.edu.br/oculum/article/view/4319. Acesso em: 15 jun. 2023.

TAVARES, Jeferson Cristiano. **Polos urbanos e eixos rodoviários no Estado de São Paulo**. 2015. Tese (Doutorado em Teoria e História da Arquitetura e do Urbanismo) - Instituto de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2015. doi:10.11606/T.102. 2016.tde -01022016-181133. Acesso em: 1 out. 2024.

VIEIRA, R. R. T. **Autorizações ferroviárias no Brasil: desafios do novo modelo**. 2022. Monografia (Especialização) – Escola Superior do Tribunal de Contas da União, 2022.

WERNER, Deborah. **Rodadas de neoliberalização, provisão de infraestrutura e "efeito- China" no Brasil pós-1990**. EURE (Santiago), v. 46, n. 139, p. 143-162, set. 2020. Disponível em: http://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0250-71612020000300143&lng=es&nrm=iso. Acesso em: 1 out. 2024.

YANO, N. M.; MONTEIRO, S. M. M. **Mudanças institucionais na década de 1990 e seus efeitos sobre a produtividade total de fatores.** In: Encontro Nacional de Economia, 36, 2008, Salvador. Anais... Disponível em: http://www.anpec.org.br/encontro2008/artigos/200807211610100-.pdf. Acesso em: 1 jun. 2024.

ZMITROWICZ, W.; ANGELIS NETO, G. **Infra-estrutura urbana**. São Paulo: EPUSP, 1997.

7

# *RAILWAY INFRASTRUCTURE AND URBAN AND REGIONAL DYNAMICS: IMPACTS, CONFLICTS, AND TERRITORIAL TRANSFORMATIONS*

BEATRIZ KOPPERSCHMIDT DE OLIVEIRA

## *ABSTRACT:*

The railroad system in the interior of São Paulo has undergone restructuring driven by economic, political, and institutional changes, creating conflicts between the railways and the urban fabric. Railroads, once the driving force behind territorial development and urban growth, now operate primarily under a private-sector model focused on commodities transport, disconnecting from local dynamics. This leads to socio-spatial segregation, land disputs, the loss of heritage character, and physical barriers within cities. The current approach fragments the railway system, turning it into an exclusionary logistics corridor. On the other hand, cities impact railroads by irregularly occupying their margins or by proposing redevelopment projects aligned with real estate interests. There is a lack of integration between federal, state, and municipal planning, hindering solutions, especially at a time when the impacts of climate change are intensifying. Regional Design's proposal emerges as an integrative alternative, envisioning the railroad as a multifunctional infrastructure capable of promoting territorial integration. Thus, the railroad has the potential to become a vector of urban and regional transformation, but this requires coordinated governance and multiscale planning.

### Keywords

Railway infrastructure; planning; climate change

## INTRODUCTION

Railway has had both direct and indirect influences on urban and regional development in Brazil, particularly in the state of São Paulo. Throughout the 19th and 20th centuries, railroads not only facilitated the transport of people and goods but also shaped the spatial organization of cities, creating new centers of activity and stimulating economic growth. However, with changing economic demands and the emergence of new infrastructure, such as highways, railroads lost their initial prominence, becoming more focused on the transport of commodities and less integrated into the urban fabric.

In this context, the study of railways in the interior of São Paulo highlights the complex interaction between infrastructure and urban dynamics, revealing both opportunities and challenges. Although railways have promoted economic development and urbanization, they have also created physical and social barriers within cities, contributing to spatial segregation and giving rise to land-use conflicts that persist to this day. The repurposing and integration of these infrastructures into contemporary urban planning therefore represent an opportunity to improve urban cohesion and regional sustainability, requiring a coordinated approach among different levels of government.

To fully understand this process, it is essential to recognize that Brazil's current railways infrastructure is the result of historical power structures. Initially, the companies were established by privately owned firms, focused on serving their own interests. Subsequently, these companies were consolidated under the administration of the Federal Government through Rede Ferroviária Federal S.A. (RFFSA). Later, railways operations came under the control of large corporations, which operates primarily to meet market demands.

This historical trajectory highlights how infrastructure has become the primary physical and technological asset of modern cities (Graham; Marvin, 2001), although conflicts between infrastructure systems and the urban fabric are a recurring phenomenon. The construction of spaces of mobility and flow for some often

implies the creation of barriers for others (Graham; Marvin, 2001), and this is a central issue in the relationship between the railroad and the city, both of which are embedded in regional dynamics.

The results of the study carried out in six cities in the interior of São Paulo reinforce this perspective by demonstrating that processes involving the railroad—a regional infrastructure—do not occur in isolation within a single city. On the contrary, they manifest themselves across urban systems, with varying scales, forms, and temporalities, revealing both inconsistencies and systemic continuities.

Furthermore, infrastructure systems are deeply intertwined with broader socio-technical, political, and cultural processes, which have uncertain effects in different places and at times. As Graham and Marvin (2001) observe, infrastructure can fragment the urban experience, and this fragmentation becomes even more evident in the face of new urban and regional dynamics. In the case of the São Paulo's railways, there is an intensification of the unequal development of regional infrastructure, in which physically close spaces may exhibit less intense relationships and exchanges than locations that are distant from one another.

In light of this, territorial organizations, especially in metropolitan regions, point to the need for new spatial strategies and planning scales (Neuman; Zonneveld, 2021). The emerging conditions resulting from globalization, climate change, and the growth of medium-sized city systems demand more effective coordination of mobility and connectivity, in which infrastructure plays a foundational role.

## *1. INFRASTRUCTURE IN DISPUTE: CHANGES TO THE RAIL SYSTEM AND THEIR EFFECTS ON THE URBAN TERRITORY*

Although there is no consensus in Brazil regarding the definition of infrastructure (IPEA, 2010) and, in particular, regarding the scale of its impacts, this analysis considers infrastructure from three perspectives: related to a system of services, in

general; public and composed of technical networks (Oxford, 2024), as an invisible support, material or immaterial, indispensable for a concrete or abstract built or social structure; and as the basis of social organization (legal, cultural, political) through the constitution of a set of economic relations of production (Glass; Addie; Nelles, 2019).

In other words: infrastructure can be understood as the technical system of equipment and services necessary for the development of urban functions, as well as the functionalities that encompass social, economic and institutional aspects (Zmitrowicz, 1997). Its impact is felt across the territory and, especially, within the city; its scope is not always limited to the city's boundaries because, regardless of its nature, it is connected to larger systems. Even though it affects the city, its scope extends beyond municipal boundaries, interconnecting with environmental or technical constraints. Even in terms of its functionality, the scope of infrastructure goes beyond local functions and corresponds to regional, national and even global linkages.

Recent studies have revived interest in the infrastructure associated with networked cities (Regional Studies Association, 2024) and seek to highlight how infrastructure influences daily life, governance, and development at the local and regional levels through reciprocal interactions. They also demonstrate how investments (or the lack thereof) reveal material and discursive elements that produce, structure, and modify cities that are systemically interconnected with regional reach.

The fiscal and political crises of the 1970s and 1980s spurred the adoption of neoliberal policies aimed at reducing the role of the state. In this context, RFFSA was included in the National Privatization Program in 1992, and between 1996 and 1998, its cargo transport operations were granted to the private sector. In 1998, FEPASA was incorporated into the RFFSA and subsequently privatized as well. The railway system was divided into six regional networks and granted to private companies, while non-operational assets—such as stations, warehouses, and administrative buildings—remained under federal control. This separation marked the

beginning of a fragmented management of the rail network and its assets, significantly altering the relationship between the railways and the urban systems, which, although still existing, began to be reconfigured under different logics and forms of coordination.

Therefore, it is important to note that the railway infrastructure was not abandoned, but rather adapted to the economic and political context, changing the way it operates through a new business model. New techniques and technologies have altered both its operation and its relationship with railway complexes. This shift also marks the beginning of a fragmented management of railway lines and the infrastructure itself, and, in both cases, of the relationship with cities. While railway lines once served as a catalyst for the formation of urban systems, these systems have not ceased to exist; rather, they have become part of other relationships, distinct from those derived from their original formation.

Since 1996, the current model has allowed private companies to operate existing stretches of railroads and, through competitive bidding processes conducted by the government, to build new lines in accordance with the plans and conditions established by the public authorities. With the recent passage of the Railroad Law, in conjuction with Law 13.448/2017, a debate has arisen regarding the implementation and operation of shortlines in Brazil.

Shortlines are small- and medium-sized railroads (classes II and III) that operate primarly at the local level, either complementing national or international railroads (class I) or operating independently (Lanza, 2020; Dalto; et al, 2023). This model is inspired by the U.S. experience, where shortlines expanded significantly following the enactment of the Staggers Rail Act in 1980, which relaxed regulations and allowed for regional and local operations, often in collaboration with mainline railroads (Dalto; et al, 2023). Studies conducted by the COPPE program (Research and Development in Railway Engineering) indicate that the configuration of the current network makes it unfeasible to incorporate other goods, among other factors, due to the scarcity and even absence of intermodal terminals (Donato; et al., 2022).

As a result, railroads essentially function as long corridors connecting major mining companies and large agricultural producers directly to ports, thereby harming the railroad's role as a diversified mode of transportation that does not include small-scale general cargo services.

Furthermore, this model can have environmental impacts due to the risks of accidents and contamination; land-use impacts on property values, which affect municipal planning; conflicts in areas subject to relocation; and the creation of barriers and attractions. In other words, when applied to the Brazilian context, this model further fragments transportation—which is already fragmented from a territorial perspective.

The regional relationships that emerged from the railroads have changed, with some growing stronger and others fading away. Based on the study of six different cities in the interior of São Paulo state (Araraquara, Ribeirão Preto, São Carlos, Rio Claro, Cordeirópolis, and Casa Branca), which share the presence of railroads, incompatibilities and vulnerabilities were revealed that systematically arise in these cities, forming a system of cities that no longer rely on the linearity of the rails as a connecting element, but rather on the conflicting relationships and conflicts they create within the urban fabric, as shown in the table below.

The six cities were selected for study based on the impacts and transformations wrought by the railroad on the urban fabric. The differences between the cities were a key factor in the selection, as it was understood that they would offer unique perspectives when examining the same subject of study (railways and the territory). The aim was to identify similarities and differences when examining the urban system, in which regional relationships have implications for local dynamics—in some cases in isolation, but in others affecting the entire system.

Cordeirópolis and Casa Branca are small towns located along stretches of the former Paulista and Mogiana lines, respectively, and each presents a distinct situation regarding the development and transformation of the railway network.

São Carlos and Araraquara, medium-sized cities whose development is linked to the coffee industry, have shared a railway infrastructure that has shaped the region since its implementation, yet each has a distinct relationship with the urban landscape. São Carlos was marked by the collapse of part of the railroad during extreme rainfall events, while Araraquara faces recurrent climate emergencies, highlighting the vulnerability of these infrastructures to environmental changes. Both are hubs of the Central Administrative Region, with complementary functions and distinct planning visions.

Rio Claro was included in the study due to its historical and current relevance to the railway system. The city is home to maintenance workshops that are still in operation in its central region, making it essential for understanding the impacts of the railroad's continued presence on urban dynamics. Its strategic location, near the Santa Gertrudes Ceramic Hub and the Metropolitan Region of Piracicaba, expands the territorial and regional scope of the study.

Ribeirão Preto, a large city and the seat of a metropolitan region, was selected for its logistical importance, as it serves as a hub for various modesof transportation and is central to understanding broader infrastructure connections. Its selection allows for an analysis of the railway's impacts in a city that exerts a strong influence on regional organization and economic flows.

At first, the layout of urban systems was intrinsically linked to the development of railroad companies and agricultural production. These companies played a key role in the formation and development of cities, establishing a system organized along linear lines. This system was characterized, among other aspects, by the linear network of railways, shared productive activities, and shared livelihoods and services.

The integration of the cities along a single railway line was ensured by the railroad, which served as an essential link for the economic and social development of these communities. Thus, urban systems emerged, initially forming along the two railway lines and constituting distinct systems. However, the cities along

the railway lines are no longer understood as separate systems by railway companies, but rather as a single urban system shaped by both conflicts and continuities.

With the rise of highways and the repurposing of railways, highways became the primary mode of transportation, while railways were adapted to meet new demands, often focusing on freight and long-distance transport. In the current context, urban conflicts and incompatibilities are evident, in which the relationship between urbanized areas and railways is complex, marked by conflicts of interest and incompatibilities. Cities have come to face common challenges, such as the integration of railways into urban centers and the management of the environmental and social impacts associated with them. The urban system constituted by transportation infrastructure is thus transformed by its obsolescence, taking on new characteristics and giving rise to systems of incompatibilities and conflicts.

The analysis of the cities of Cordeirópolis, Rio Claro, São Carlos, Araraquara, Casa Branca, and Ribeirão Preto revealed systemic urban problems in the relationship between the railroad and the urban fabric, though these manifest differently in each territory. The analysis, summarized in Figure 1, was based on a historical review of the railway's implantations, an examination of urban morphology, consultation of technical documents, and field visits. Among the problems identified are conflicts between infrastructure, risks associated with crossings, incompatibilities between land uses in the surrounding areas, irregular occupations of federal lands, legal uncertainty, socio-environmental vulnerability, and the exacerbation of climate impacts. Added to this are the loss of characteristics of the railroad heritage, evident in abandoned or unused properties, and the presence of deactivated lines that are occupied irregularly or converted into urban voids.

| | CORDEIRÓPOLIS | RIO CLARO | SÃO CARLOS | ARARAQUARA | CASA BRANCA | RIBEIRÃO PRETO |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Overlapping | X | X | X | X | X | X |
| Land Issue: Housing on Union land - non-building areas along railway lines and conflicts of use | X | X | X | X | X | X |
| Decharacterization of railway heritage | X | X | X | X | X | X |
| Socio-environmental issues: environmental impacts due to the presence of infrastructure and its relationship with the surroundings | X | X | X | X | X | X |
| Conflicts with pedestrian crossings and insecurity | X | X | X | X | | X |
| Conflicts with urban drainage | X | X | X | | X | X |
| Formation of barriers | X | X | X | X | | X |
| Socioeconomic segregation | X | X | X | X | | X |
| Impacts of climate change and urbanization on infrastructure | X | X | X | X | | X |
| Conflictual relationship with infrastructure uses of the surroundings) | X | X | X | | | X |
| Dangers caused by the proximity of the railway line | X | X | X | | | |
| Deactivated lines without occupations: idle areas, subject to occupation | | X | | X | | X |
| Deactivated lines in the urban fabric: formation of irregular occupations | | | | | X | X |

**Figure 01:** Incompatibilities in the relationship between the railroad and the urban fabric identified in the cities of Cordeirópolis, Rio Claro, São Claro, Araraquara, Casa Branca, and Ribeirão Preto. *Source: Prepared by the author, 2024*

Although railways pose significant challenges that require planning, investments, and institutional coordination—and generate new conflicts—they also preserve positive values linked to

memory, heritage, and the potential of existing urban infrastructure. These aspects, however, are often overshadowed by the challenges that infrastructure poses to the local area.

## 2. URBAN PROBLEMS ASSOCIATED WITH THE RAILWAY: LOCAL MANIFESTATIONS OF A REGIONAL SYSTEM

The presence of railway infrastructure within the urban fabric of cities in the interior of São Paulo gives rise a series of conflicts and challenges, as shown in Figure 01. However, they manifest themselves in different ways depending on the local context. Among the main problems observed are conflicts with other urban infrastructures, especially the road system; the creation of physical and social barriers that contribute to socio-spatial segregation; the existence of at-grade crossings that pose safety risks; the irregular occupation of areas along both active and deactivated railway lines; and land disputes involving federal lands, stand out. Added to these issues is the vulnerability of infrastructures to the impacts of climate change, which affects both the railroad and the city, and the loss of characteristics of the railroad heritage, which is often degraded or abandoned after sections are deactivated.

These elements highlight the complexity of the relationship between railroads and contemporary cities, marked by tensions between regional and local scales and by the urgent need for strategies of reconnection, preservation, and integrated planning. Based on these issues, the study analyzes how these conflicts manifest themselves in the six cities observed, revealing both recurring patterns and unique characteristics in their urban and territorial dynamics.

The coexistence of railways and other urban systems, such as road networks, requires the implementation of various local solutions to integrate the tracks into the urban landscape. In Rio Claro and São Carlos, the presence of at-grade crossings in the city center poses a constant risk to the population and hinders the flow of urban traffic. In Cordeirópolis, the lack of overpasses and the unevenness between the tracks and the central area result in

improvised crossings, with heavy circulation of pedestrians and cyclists on the tracks, increasing the risks of accidents.

**Figure 02:** Conflicts of overlapping different infrastructures in Rio Claro.
*Source: authorship, 2023.*

The railroad also established itself as a physical and social barrier, reinforcing preexisting inequalities. In Araraquara, its construction in a belt-like configuration accentuated the separation between the vertical central area and Vila Xavier, a neighborhood characterized by lower incomes and more precarious urban infrastructure, which was initially occupied by railroad workers and their families.

In Ribeirão Preto, the railroad, combined with other regional infrastructures, marks the boundary between vulnerable housing areas and gated communities. Similar situations occur in Rio Claro, São Carlos, and Cordeirópolis, where social housing complexes, informal subdivisions, and old railroad towns are concentrated on one side of the tracks, in contrast to higher-income areas on the other. Although segregation is a broader process, the railroad territorializes and intensifies its effects.

The lack of proper integration between the railroad and the city is also evident in the form of informal crossings. In Cordeirópolis, families living near the tracks use the railroad right-of-way daily, exposing themselves to risks, while in Rio Claro and

São Carlos, active rail traffic in central areas intensifies conflicts. Concessionaires have installed railings and walls to restrict access, reducing risks but reinforcing urban fragmentation.

**Figure 03:** Conflicts of overlapping different infrastructures in São Carlos.
*Source: authorship, 2023.*

In Ribeirão Preto, the Ocupação Cidade Locomotiva (Locomotive City Occupation) stands out, with more than 300 families living in conditions of socio-environmental vulnerability along the railroad tracks and near the airport. In Cordeirópolis, precarious constructions were identified between the Tatu stream and the tracks, some within the no-build zone. Similar settlements exist in São Carlos and Casa Branca. Along the decommissioned stretches in Ribeirão Preto and Casa Branca, these settlements continue to grow, aggravating land and environmental conflicts.

**Figure 04:** Locomotive City Occupation, along the railroad tracks in Ribeirão Preto. *Source: LabCidade, 2020.*

The deactivation of railway sections, often seen as a solution to mitigate negative impacts, has created new urban challenges. In Rio Claro and Ribeirão Preto, areas formerly occupied by tracks were abandoned or irregularly occupied, becoming degraded urban voids and hotspots for insecurity and waste dumping. In Araraquara and Rio Claro, even though railway bypasses divert part of the traffic, workshops and structures still operate in central areas and spark debates about their future. In Rio Claro, plans call for transforming the railroad corridors into expressways, in line with the real estate development; in Araraquara, efforts are underway to enhance the areas based on their environmental and heritage values, proposing a Railway Park that integrates drainage, mobility and culture.

**Figure 05:** Railway complex in Araraquara. *Source: Authored by the author, 2023.*

Rail infrastructure is also vulnerable to extreme weather events, which are exacerbated by urbanization and environmental changes. Graham (2010) describes infrastructure as "silent glue", and shows that its failure reveals systemic weaknesses. The most significant case was the collapse of the railway infrastructure in São Carlos (2022). The line, built over the ridges and over the Monjolinho Stream, had undersized transposition structures that were inadequate for urban growth and the increase in extreme events. Heavy rains resulted in a collapse, causing widespread economic damage, including losses in the national grain production chain and risks to the population, which could have been mitigated with prior adaptations.

**Figure 06:** Collapse of the railway infrastructure in São Carlos.
*Source: G1, accessed June 24, 2023.*

The technical decision regarding the location and route of the railroad is crucial for understanding its impacts and its relationship with the surrounding environment, especially given the intensifying effects of climate change. In cities where the route follows the valley bottom, such as Cordeirópolis and Araraquara, the rails and their non-buildable zones function as important permeable spaces, essential for urban drainage. Even so, conflicts between the railroad and the drainage system are recurrent. The railroad, as a fixed linear structure, requires supplementary—and often improvised—works to control water flows, such as the hydraulic ladder built in Cordeirópolis. The tracks are also flanked by vulnerable settlements, with accumulation of trash and waste that clog drainage systems, aggravating floodings and health risks.

**Figure 07:** Hydraulic ladder near the tracks in Cordeirópolis.
*Source: Authored by the author, 2023.*

**Figure 08:** Socio-environmental problems near active rails in Ribeirão Preto. *Source: Authored by the author, 2023.*

The analysis reveals that, although the railroad has lost its central role as an urban connector, with the rise of highways, it continues to shape the landscape and influence daily urban life—as a barrier, a reminder of the past, a source of conflict, or an opportunity. Thus, the formation of urban systems around the railroad has led to systemic problems stemming from the patterns of occupation and expansion associated with this infrastructure. These challenges are consistently replicated across the municipalities studied, although with local variations.

## 3. RAILWAY RECONFIGURATION AND TERRITORIAL PLANNING: MULTISCALE CHALLENGES

The cities exhibit distinct responses to the presence of railways, depending on their size, institutional capacities, and planning models. In small cities, such as Cordeirópolis and Casa Branca, challenges related to land regularization, technical and financial constraints, and limited coordination with the railway concessionaire predominate. Although historically central to their development, railroads today exert little influence on urban dynamics, whether due to their peripheral location (such as the Casa Branca bypass) or the shift in their current functions, which are primarily focused on the transport of commodities. Redevelopment initiatives face bureaucratic obstacles and a lack of channels for dialogue with the operational stakeholders.

In medium-sized cities—such as São Carlos, Araraquara and Rio Claro—there is more active performance, although it is often tied to the real estate market and the 20th-century functionalist planning. In Rio Claro, the deactivation of central railroad operations is treated as a real estate opportunity through a Consortium Urban Operations Zone (Rio Claro, 2016), that has the potential to transform the urban landscape but disregards the cultural, social, patrimonial and environmental potential of the railway, as well as the central permeable areas that are critical in the face of climate change. In this model, the railroad is viewed as an obstacle to growth, rather than as an urban asset.

Araraquara takes a contrasting approach. Although it also plans to relocate central operations, it proposes preserving the Railway Edge, integrating its environmental, historical, and social values into urban planning (Araraquara, 2019). The proposal combines traffic adjustments and the redevelopment of the surrounding area, adopting a systemic and patrimonial logic, aligning with urban planning concepts that recognize the multifunctionality of railway infrastructure.

In larger cities, such as Ribeirão Preto, there is a complete disconnect between the railroad and local planning, limiting its role

to logistics (Ribeirão Preto, 2019). The railroad becomes a purely technical and sector-specific element, with no integration into policies on mobility, urban development, or heritage. This disarticulation reflects a process of erasing the railroad from the urban imagination, even when its physical presence persists in the territory.

In general, three patterns of approach can be identified in the municipalities analyzed. In small cities, the absence of specific strategies predominates, with a heavy reliance on the concessionaire's action and limited local technical and institutional capacity. In medium-sized municipalities, contrasting models emerge: on the one hand, market-oriented and sector-specific approaches that treat the railroad as an obstacle to growth (as in Rio Claro); on the other, integrative and patrimonial proposals that recognize the railroad as an urban asset (as in Araraquara). In larger cities, however, there is a trend toward completely excluding the railroad from local planning, prioritizing its logistical function while neglecting its urban impacts and its potential for territorial integration.

The State of São Paulo plans to invest in passenger rail transport, such as the Intercity Trains (Trens Intercidades – TICs), aiming to rebalance the transportation system and connect medium-sized and large cities. The reintroduction of regional passenger rail transport comes in response to calls for more sustainable mobility and the need to link medium-sized and large cities through efficient corridors.

The construction of new rail lines or the upgrading of existing stretches, especially in urbanized areas, involves expropriation and relocation processes, noise emission, and air pollution, as well as conflicts with the road network and surrounding communities. Indirect impacts must also be considered, such as the potential for socio-spatial segregation between the sides of the tracks, the emergence of new axes of urban expansion, and changes to municipal urban drainage infrastructure.

In addition, the proposed projects prioritize the consolidation of existing development corridors in the state by concentrating greater infrastructure, investments, and flows, thereby reproducing the hub-and-corridor model that led to a pattern of urbanization in the state of São Paulo and created the conditions

for productive restructuring (Tavares, 2018), with significant territorial imbalances. However, this structure, which concentrates growth in the hubs and along the axes, does not propose to extend development to other regions, and the resumption of this regional planning model may intensify regional inequality.

At the federal level, there are various initiatives, plans and guidelines for the infrastructure sector. In recent years, the federal government's actions have sought to align and guide the development of plans and projects aimed at creating a more efficient and sustainable transport sector, within the context of a global mobilization to adopt measures for climate change mitigation and adaptation. Partnerships with international institutions have been established, such as the partnership with the *Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit* (GIZ) to implement the ProAdapta project. Partnerships have also been formed with national higher education and research institutions.

Since 2017, discussions have begun regarding the model for railway concession contracts, driven by Law 13,448, which established guidelines for the extension and rebidding of contracts in effect from 1996 to 1998, with a 30-year term. During the process of early renewal of these contracts, the debate also arose regarding the return to the federal government of underutilized railway stretches that were no longer of interest to the concessionaires (Dalto et al., 2023). According to data from the National Land Transport Agency (Agência Nacional de Transportes Terrestres – ANTT), approximately 38.67% of the Brazilian railway network, totaling 8,335.42 km, are not used by concessionaires due to low demand and economic unfeasibility.

In 2018, Bill 261 proposed a new legal framework for railroads, introducing the possibility of operating permits in addition to concessions. Transformed into Provisional Measure 1,065/2021 and Law 14,273/2021, known as the Railways Law, the legislation transferred the review of new rail segments to ANTT. Companies such as *China Communication Construction Company*, *Rumo*, *Russian Railways International*, *China Railway Corporation*, and a consortium formed by *Amaggi*, *Dreyfus*, *Cargill*, *Bunge*, and ADM have

expressed interest in major concessions, such as the North-South Railway, Fiol, and Ferrogrão (Aguiar, 2017; Fernandes, 2018).

The growing involvement of international capital—such as that of the *China Communication Construction Company*, *Russian Railways International* and agribusiness-linked consortia, in the face of a strengthening of agricultural commodity exports and the expansion of the agricultural frontier—highlights a scenario that favors concessions driven by private interests (Aguiar, 2017; Fernandes, 2018). The combination of extremely low public investments and a strong presence of foreign capital intensifies disputes over logistical control and may exacerbate territorial fragmentation (Werner, 2020).

Although federal planning proposes broad guidelines, incentives for shortlines may reinforce fragmentation by prioritizing local and sectoral interests. Recent initiatives tend to favor systems connected to international export networks, with limited urban multimodal functionality. As demonstrated in this study, railroads have shaped urban systems, consolidating productive and urban corridors; new investments may transform or reinforce these corridors, redefining regional relationships and generating new patterns of permanence and conflicts.

On the global stage, the international division of labor has intensified in the globalized world, directly impacting the organization of regional spaces in Brazil, particularly following changes in the Brazilian political context in 2016, with deregulations that facilitated control of strategic resources and intensified international disputes over logistics concessions (Werner, 2020).

Vieira (2022), in his study of the new railway operation model, highlights significant differences between the two models. He points out that the new legal framework still has gaps and lacks the academic discussions necessary to develop a model with clear rules. Inspired by the Staggers Rail Act of 1980 in the United States, during the height of economic liberalism, the Brazilian authorization regime reflects foreign influences. However, economic, political, and social differences make it difficult to directly apply this model in the Brazilian context, despite its implementation in other

countries, indicating the need for further studies and analyses specific to the Brazilian railway system (Acosta, 2022).

Federal planning, as demonstrated in initiatives such as the PNL 2035, seeks to exercise control over territory through strategic projects currently under consideration. However, the adoption of the shortlines model may end up promoting territorial fragmentation. Although federal planning proposes broader and more integrated development, the promotion of these regional and smaller-scale railway lines, influenced by neoliberal production logic, ultimately prioritizes local and sectoral interests at the expense of territorial cohesion that would strengthen the country as a whole.

Opening up to private and international capital poses challenges for urban and regional planning. Public-private partnerships are essential, but they require coordinated governance across the municipal, regional, and federal levels. The lack of such coordination—evidenced in federal, state, and municipal plans—intensifies conflicts and undermines the management of railroad territories.

Thus, in the face of the challenges of urban-regional planning—especially regarding interscalability, sustainability, and territorial management—Regional Design stands out as an approach capable of integrating scales, actors, and regional structures. Originating in the Netherlands and Italy, Regional Design moves away from traditional regulatory planning, recognizing complex interconnections between places (Neuman; Zonneveld, 2021; Beloto, 2022). In the context of São Paulo, it presents itself as a promising instrument for understanding and guide the transformations in the relationship between railroads, cities, and territorial systems.

By mapping regional structures, coordinating public and private actors, positioning the railway as a multifunctional infrastructure, and promoting collaborative governance, Regional Design helps overcome the historical fragmentation associated with railways. The incorporation of design and cartographic tools aids in visualizing scenarios and building more equitable territorial agreements. From this perspective, the railroad can be redirected to its role as a connector— not of barriers, but of territorial flows, connections, and opportunities, favoring a fairer, more functional, and sustainable transition.

## 4. THE EMERGENCE OF REGIONAL DESIGN: THE RAILROAD AS A VECTOR AND CHALLENGE FOR CONTEMPORARY PLANNING

Infrastructure is the main physical and technological assets of modern cities (Graham; Marvin, 2001), but conflicts between infrastructure systems and cities are recurrent. The creation of spaces for mobility and flow for some involves the creation of barriers for others (Graham; Marvin, 2001), and this is a central issue in the relationship between railroads and the urban fabric, both of which are embedded in regional dynamics.

In the case of São Paulo's railways, these conflicts manifest themselves in similar ways across different municipalities: physical barriers, socio-spatial inequalities, land disputes, environmental risks, and inefficiencies in the coordination between planning scales. Although each city faces specific challenges, the six cities studied collectively demonstrate that the railway-related processes are, above all, regional in nature—and not isolated to individual municipalities.

Infrastructure systems are linked to broader socio-technical, political, and cultural processes, which have uncertain effects in different places and times, in which infrastructure can fragment the urban experience (Graham; Marvin, 2001). Due to new urban and regional dynamics, with the intensification of the uneven development of regional infrastructures—as seen in São Paulo railroads—physically close spaces may have less intense relationships and exchanges than those that are physically distant (Graham; Marvin, 2001).

Territorial organizations, particularly metropolitan regions, highlight the need for new spatial strategies and planning scales (Neuman; Zonneveld, 2021). New conditions, such as globalization, climate change, and the growth of medium-sized city systems, require coordinated approaches to mobility and connectivity, in which infrastructure plays a structuring role.

The dialogue with municipal managers revealed the difficulties in implementing railroad projects due to conflicting interest, a shortage of resources, and communication barriers among fede-

ral, state, and local governments exacerbated by inconsistencies between federal, state and municipal plans. Although recent federal plans address climate change mitigation and adaptation with the support of partnerships and technical studies, and state planning emphasizes territorial integration and economic growth, local urban planning remains constrained by the internal dynamics of municipalities and institutional limitations, often out of step with larger-scale initiatives.

From this perspective, new methods and concepts are emerging in response to the challenges of urban and regional planning—particularly regarding the interscalarity of places, sustainable development and land management. Thus, Regional Design has emerged, distancing itself from regulatory planning by recognizing that spaces and places are interconnected in various ways, creating complex interrelationships across different scales (Neuman; Zonneveld, 2021), taking into account regional structures and territorial processes, and seeking to articulate public and private actors (Beloto, 2022).

Regional Design is emerging as a promising approach for Brazilian regional planning, as it provides an integrated view of the relationships between infrastructure and territorial development. In the interior of São Paulo, the railroad shaped urban systems and left behind territorial conflicts and irregularities that persist even after profound changes in the production chain and in the logic of railroad operation. Today, the railroad tends to reinforce patterns of urban and regional fragmentation, while simultaneously concentrating investments and attracting infrastructure, thereby widening inequalities, expanding areas of risk, and increasing environmental impacts.

Despite this, the repurposing and integration of railways into urban planning present significant opportunities to strengthen territorial cohesion, provided they are supported by coordinated governance and a multiscale vision. Regional Design contributes by proposing the redevelopment of the railroad as a multifunctional infrastructure, capable of integrating logistics, mobility, heritage, ecology, and urban uses, overcoming its current fragmented condition. This approach also fosters the development of shared visions of the future and the alignment among federal, state, and municipal

policies, supporting design processes that make explicit the regional relationships between urban systems.

The fragmentation resulting from current economic dynamics has contributed to the breakdown of infrastructure and of the very urban systems organized around that infrastructure, as well as giving rise to a series of similar conflicts in cities that still incorporate railway functions into their urban fabric. The railroad continues to influence land use, attracting other infrastructure and investments, but also creating areas of risk, increasing segregation, and causing environmental impacts, because its functions have changed and the context in which it operates has also changed. The absence of plans that address these conflicts contributes to the intensification of their consequences.

Infrastructure reshapes the structure and morphology of various cities over time, and the changes in how it operates—by giving concrete form to global relationships within the urban environment—bring to the surface both old and new conflicts, which in turn require new forms of action.

In the face of global changes and environmental challenges, one approach to planning is to incorporate the principles of Regional Design to overcome the fragmentation and conflicts historically associated with railway infrastructure. This implies, first and foremost, coordination across planning scales, promoting alignment between federal, state, and municipal plans based on collectively constructed visions of the future. It also involves mapping regional structures and identifying the relationships between urban systems, with a focus on functional territorial connections, rather than merely administrative ones.

It is necessary to redefine the railroad as multifunctional infrastructure, recognizing not only its logistical potential but also its landscape, heritage, and ecological value. Furthermore, the creation of collaborative governance spaces should be encouraged, in which the various stakeholders—governments, concessionaires, civil society, and the private sector—can co-create solutions and agree on responsibilities. The use of design and cartographic tools is essential, as they allow the visualization of territorial scenarios and the testing of spatial arrangements that maximize the bene-

fits of the railroad for cities. Finally, territorial equity must be promoted by combating the reproduction of inequalities through the selective distribution of infrastructure and prioritizing investments in regions peripheral to major logistics corridors.

Regional Design, by proposing an integrative, multidisciplinary, and visual approach to planning, offers ways to rethink the role of railways as a structuring element of the territory. It presents a vision of the future in which infrastructure is not a barrier but rather a catalyst for flows, integrations, and opportunities, fostering a more equitable, functional, and sustainable territorial transition.

## REFERENCES


ACOSTA, P. **Lack of investment in infrastructure undermines Brazil's productivity and competitiveness**. Folha de S. Paulo, Dec. 13, 2022. Available at: https://www1.folha.uol.com.br/colunas/pablo-acosta/2022/12/falta-de-investimento-em-infraestrutura-compromete-produtividade-e-competitividade-do-brasil.shtml. Accessed on: June 15, 2024.

AGUIAR, D. **China's infrastructure geopolitics in South America: a study based on the Tapajós case in the Brazilian Amazon**. ActionAid; Federation of Organizations for Social and Educational Assistance, 2017.

ARARAQUARA. **Master Plan of the Municipality of Araraquara**. Araraquara: City Hall, 2019.

ARAÚJO, T. B. de. **Brazil in the nineties: strategic options and regional dynamics**. Brazilian Journal of Urban and Regional Studies, [S. l.], n. 2, p. 9, 2000. DOI: 10.22296/2317-1529.2000n2p9. Available at: https://rbeur.anpur.org.br/rbeur/article/view/34. Accessed on: June 24, 2024.

BARBOSA, Benedito; FUNCK, Yan; UNGARETTI, Débora. **What the Cidade Locomotiva Occupation, in Ribeirão Preto, teaches us in times of pandemic**. LABCIDADE, April 16, 2020. Available at: http://www.labcidade.fau.usp.br/o-quea-occupation-city-loco motivates-in-streamirão-preto-us-teaches-in-times-ofpandemic/. Accessed on: June 15, 2023.

BELOTO, Fabiana. **Regional Design in Brazil: territorial articulation and urban-regional planning**. Brazilian Journal of Urban and Regional Studies, v. 24, n. 2, 2022.

BERNARDINI, Sidney Piochi. **Building infrastructures, planning territories: the Secretariat of Agriculture, Commerce and Public Works of the São Paulo State Government (1892 – 1926). 2007**. Thesis (Doctorate) – Faculty of Architecture and Urbanism, University of São Paulo, São Paulo.

CAMPOS, C. de. **Railroads and sanitation in São Paulo**. The engineer Antonio de Paula Souza of the urban territorial infrastructure network of São Paulo, 1870-1893. 2007. Thesis (PhD in History and Fundamentals of Architecture and Urbanism) – Faculty of Architecture and Urbanism, University of São Paulo, São Paulo. DOI: 10.11606/T.16.2007.t de-30112010-144111. Accessed on: 9 out. 2024.

CORDEIRÓPOLIS. **Participatory Master Plan of the Municipality of Cordeirópolis**. Cordeirópolis: City Hall, 2018.

CORRÊA, Anna Maria Martinez. Araraquara, 1790-1930 – **A Chapter in the History of Coffee in São Paulo**. Araraquara (SP): Acadêmica, 2008.

CORRÊA, Roberto Lobato. **The Urban Space**. 3rd ed. São Paulo: Editora Ática S.A, 1995.

DALTO, E. J.; SOUZA, N. T. P. de; PASSOS, P. dos. **Shortlines: the challenge of implementing them in Brazil**. BNDES Setorial, no. 57, pp. 5–71, 2023.

DONATO, M.; CERBINO, F.; SERACO, I.; RATTON NETO, H. X. **Diagnosis of the Brazilian railway sector in light of expectations regarding the early renewal of concessions**. Conjecturas, vol. 22, no. 1, pp. 510–525, 2022. Available at: https://doi.org/10.53660/CONJ-512-707

DONOSO, Verônica Garcia. **The landscape and the systems of free spaces in the contemporary urbanization of the interior of São Paulo: a case study of the area between São Carlos, Araraquara and Ribeirão Preto**. São Paulo, 2011.

FAYA JUNIOR, Silvio de Almeida. **Urban infrastructure and formation of the territory**. São Paulo: Edusp, 2020.

FERNANDES, A. **Chinese company invests in a port in Maranhão and studies railways**. Folha de S. Paulo, Mar. 19, 2018. Available at: https://www1.folha.uol.com.br/mercado/2018/03/chinesa-investe-em-porto-nomaranhao-e-estuda-ferrovias.shtml. Accessed on: June 13, 2023.

GITEC/COPPE. **Hiring of consulting services for the survey of climate impacts and risks on the existing and projected federal land transport infrastructure (road and rail)**. Output 6 – Adaptation measures. 2022b

GLASS, M. R.; ADDIE, J. P. D.; NELLES, J. **Regional infrastructures, infrastructural regionalism**. Regional Studies, v. 53, n. 12, p. 1651-1656, 2019. Available at: https://doi.org/10.1080/00343404.2019.1667968. Accessed on: March 18, 2023.

GRAHAM, Stephen; MARVIN, Simon. **Splintering Urbanism: Networked infrastructures, technological mobilities and the urban condition**. London: Routledge, 2001.

GRANDI, G. **Coffee and railway expansion: the E. F. Rio Claro Company**, 1880-1903. São Paulo: Annablume, 2007.

GUY, S.; GRAHAM, S.; MARVIN, S. **Privatized utilities and regional governance: new regional managers? Regional Studies**, v. 30, n. 8, p. 733-739, 1996. Available at: https: //do i.org/10.1080/00343409612331350018. Accessed on: May 23, 2024.

HILHORST, Jos G. M. [1973]. **Regional planning : focus on systems**. Translated by Haydn Coutinho Pimenta. 2. ed. Rio de Janeiro: Zahar Editores, 1975

INSTITUTE OF APPLIED ECONOMIC RESEARCH (IPEA); MORAIS, M. da P.; COSTA, M. A. (coords.). **Social and urban infrastructure in Brazil: contributions to a research agenda and public policy formulation**. Brasília, DF: Institute of Applied Economic Research, 2010.

LANZA, J. F. R. **Railways, markets, and public policies: shortlines as a solution for railway transport in Brazil**. São Paulo: Labrador, 2020

LENCIONI, Sandra. Region and Geography. **The Notion of Region in Geographical Thought**. In: Ana Fani Alessandri Carlos (Org.). New Paths of Geography. São Paulo: Contexto, 1999, p. 187-204.

MAIA, Danielle Souza; SANTOS Y GANGES, Laura. **Space and memory: railways and the urban constitution**. In: NATIONAL SYMPOSIUM ON URBAN GEOGRAPHY, 2023, São Paulo. Annals... São Paulo: SBG, 2023.

MAIA, Doralice Sátyro; SANTOS Y GANGES, Luis. **Urban-railway history in some Brazilian medium-sized cities: various typical situations of the urban effect of the station on its growth and urban structure**. In: III Congress of the Ibero-American Association of Urban History: Rethinking the Ibero-American City. Building the Past and Designing the Future, Table 44. City and railway: urban form and structure, 2023.

MAFRA, Nailton Silva Costa et al. **Aspects of sustainability in rail transport in Brazil in the context of climate change**. 2022.

MARINHEIRO, Marco Antonio de Lima. **Sectoral analysis: the case of the privatization of the Brazilian railroad modal**. Graduate Program in Economic Sciences of the Faculty of Sciences and Letters. UNESP, 2012.

MINISTRY OF TRANSPORT. **The Railroad Law is regulated: an opportunity for more investments for the sector**. Published on October 24, 2022. Updated on October 24, 2022. Available at: https://www.gov.br/transportes/pt-br/subjects/news/2022/10/railroad-law-and-regulated-opportunity-toomuch-investments-for-the-sector. Accessed on: August 02, 2023.

MINISTRY OF TRANSPORT. **The new regulatory framework for Brazilian railways**. Published on April 7, 2022. Updated on June 20, 2023. Available at: https://www.gov.br/transportes/pt-br/assuntos/conjur/o-novo-marco-regulatorio-das-brazilian-railways. Accessed on: August 02, 2023

MOURA JÚNIOR, Agnaldo Oliveira et al. **Railways from 1890 to 2016: a defragmented structure in Brazilian history**. Research, Society and Development, v. 7, n. 9, p. e1379442,

2018. DOI: 10.17648/rsd-v7i9.442. Available at: https://rsdjournal.org/index.php/rsd/article/view/442. Accessed on: October 02, 2022

NEUMAN, Michael; ZONNEVELD, Wil. **The resurgence of regional design**. European Planning Studies, v. 19, n. 10, p. 1621–1636, 2021.

PRADO JÚNIOR, Caio. **Formação do Brasil contemporâneo: colônia**. São Paulo: Brasiliense, 1956.

RIBEIRÃO PRETO. **Master Plan for Urban and Environmental Development of Ribeirão Preto**. Ribeirão Preto: City Hall, 2019.

RIO CLARO. **Municipal Master Plan of Rio Claro**. Rio Claro: City Hall, 2016.

SILVA, Guilherme Jonas Costa da; MARTINS, Humberto Eduardo de Paula; NEDER, Henrique Dantas. **Investments in transport infrastructure and regional inequalities in Brazil: an analysis of the impacts of the Growth Acceleration Program (PAC)**. Brazilian Journal of Political Economy, v. 36, n. 4, p. 840-863, Oct. 2016

SÃO CARLOS. **Master Plan of the Municipality of São Carlos**. São Carlos: City Hall, 2018.

STEFANI, Carlos. **Railroad and city: the Companhia Paulista de Estradas de Ferro and regional urban development.** Campinas: PUC-Campinas, 2007.

STEINBERGER, Marília; BRUNA, Gilda Collet. **Medium-sized cities: links between the urban-regional and the public-private.** In: ANDRADE, Thompson Almeida; SERRA, Rodrigo Valente (eds.). Medium-sized cities Rio de Janeiro: Ipea, 2001.

TAVARES, Jeferson Cristiano. **Infrastructure in the construction of the national territory, decades from 1930 to 1970: architecture, urbanism and networks**. Oculum Essays, v. 17, p. 1-19, 2020. DOI: 10.24220/2318-0919v17e2020a4319. Available at: https://periodicos.puc-campinas.edu.br/oculum/article/view/4319. Accessed on: June 15, 2023.

TAVARES, Jeferson Cristiano. **Urban centers and highways in the State of São Paulo**. 2015. Thesis (PhD in Theory and History of Architecture and Urbanism) - Institute of Architecture and Urbanism, University of São Paulo, São Carlos, 2015. doi:10.11606/T.102.2016.tde-01022016-181133. Accessed on: 1 out. 2024.

VIEIRA, R. R. T. **Railway authorizations in Brazil: challenges of the new model**. 2022. Monograph (Specialization) – Higher School of the Federal Court of Accounts, 2022.

WERNER, Deborah. **Rounds of neoliberalization, infrastructure provision and the "China effect" in post-1990 Brazil**. EURE (Santiago), v. 46, n. 139, p. 143-162, set. 2020. Available at: http://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0250-71612020000300143&lng=es&nrm=iso. Accessed on: 1 out. 2024.

WHITE HOUSE. **Participatory Master Plan of the Municipality of Casa Branca**. Casa Branca: City Hall, 2022.

YANO, N. M.; MONTEIRO, S. M. M. **Institutional changes in the 1990s and their effects on total factor productivity**. In: Encontro Nacional de Economia, 36, 2008, Salvador. Annals... Available at: http://www.anpec.org.br/encontro2008/artigos/2008072116 10100-.pdf. Accessed on: June 1, 2024.

ZMITROWICZ, W.; ANGELIS NETO, G. **Urban infrastructure**. São Paulo: EPUSP, 1997.

8

# ENTRE A INFRAESTRUTURA E A CIDADE: AEROPORTO LEITE LOPES EM RIBEIRÃO PRETO – QUESTÕES FUNDIÁRIAS, IMPACTOS SOCIOAMBIENTAIS E CONFLITOS SOCIAIS

THIAGO PIZZO SCATENA

## RESUMO

O objeto deste capítulo é a relação histórica entre o Aeroporto Leite Lopes e a cidade de Ribeirão Preto, SP, analisada através da história fundiária da infraestrutura aeroportuária; do uso do solo e suas alterações decorrentes de legislações urbanístico-ambientais; do projeto de internacionalização do Aeroporto Leite Lopes; dos impactos socioambientais que a infraestrutura exerce sobre seu entorno imediato e sobre o solo que ocupa; e dos conflitos sociais decorrentes dos impactos de ruídos e da valorização imobiliária. O objetivo é apresentar e analisar como os conflitos gerados a partir desse relacionamento podem ser mitigados e/ou solucionados através de legislações, planos e instrumentos já existentes no Município, tendo como horizonte a promoção de resiliência social e ambiental que a cidade e população demandam à infraestrutura.

**Palavras-chave:**

Infraestrutura aeroportuária; Ribeirão Preto; conflitos.

DOI: 10.66949/w7d1k8p4

## INTRODUÇÃO

O capítulo tem como objeto de análise a relação entre o Aeroporto Estadual Dr. Leite Lopes (Aeroporto Leite Lopes) e a cidade de Ribeirão Preto, SP. A análise é feita considerando de que modo a infraestrutura aeroportuária influencia e é influenciada pelo processo de urbanização da cidade, a partir dos seguintes aspectos: a complexidade da questão fundiária relacionada à formação da infraestrutura; os impactos socioambientais que essa infraestrutura exerce sobre seu entorno imediato e sobre a zona de recarga do Aquífero Guarani; e o conflito crescente decorrente do projeto de internacionalização da infraestrutura, somado à alteração do uso do solo na região, notadamente em relação às favelas localizadas nas proximidades do aeroporto.

O objetivo deste estudo é analisar a desconexão histórica entre a regulação do uso do solo, por meio da legislação urbanístico-ambiental, e os impactos gerados pela infraestrutura aeroportuária, especialmente no que diz respeito aos processos de valorização e desvalorização fundiária. Essa desconexão manifesta-se nos impactos ambientais sobre o Sistema Aquífero Guarani, na emissão de ruídos aeronáuticos que afetam o entorno do aeroporto, nos conflitos fundiários judicializados, na remoção de populações residentes nas imediações da infraestrutura, na interrupção e no atraso de investimentos em desenvolvimento econômico, e na descontinuidade de projetos e políticas públicas. Pretende-se, ainda, apresentar propostas de solução e estratégias de mitigação que visem à promoção da resiliência ambiental e social, em consonância com as especificidades do objeto deste estudo.

O Leite Lopes era o aeroporto de maior fluxo de passageiros administrado pelo Departamento Aeroviário do Estado de São Paulo (DAESP) até a data da entrega da sua administração à iniciativa privada, em abril de 2022, para o consórcio privado brasileiro Rede Voa. É o quarto maior aeroporto em fluxo de passageiros do estado de São Paulo, atrás dos Aeroportos de Cumbica, Congonhas e de Viracopos. A sua infraestrutura interna possui 15 hangares e terminais de carga, restaurante, posto de bombeiros, postos de abastecimento de aviação da BR Aviation e AIR BP, torre de comando, jardim

meteorológico, antena MAER, cabines de força KF, radares KC/KT e um terminal de passageiros com 5.000 m² de área coberta, com dois pavimentos. A pista de pouso e decolagem possui 2.100 metros por 45 metros e comporta aeronaves como Airbus A320, operadas pelas companhias aéreas Azul e TAM; E195, operada pela Azul; E190, operada pela TAM; e ATR72, operada pela Azul e Companhia Passaredo.

**Figura 1:** Polígono do Aeroporto Leite Lopes em amarelo, com destaque para formas de ocupação em seu entorno. *Fonte: Elaboração própria a partir de imagem de satélite do Google Earth de 30 de julho de 2025.*

## FORMAÇÃO DO AEROPORTO LEITE LOPES: A QUESTÃO FUNDIÁRIA E URBANIZAÇÃO DA SUA REGIÃO

O Aeroporto Leite Lopes está localizado na Zona Norte da cidade de Ribeirão Preto (Figura 1), região que foi historicamente destinada, pelo poder público e pela iniciativa privada, à moradia da classe operária (Scatena, 2022). Trata-se de uma área onde foram instalados equipamentos urbanos considerados indesejáveis, como

indústrias, cemitérios, matadouros e asilo manicomial (Silva, 2008). Também se observa ali uma concentração de conjuntos habitacionais de baixa renda construídos pela COHAB-RP (Dos Santos, 2017), loteamentos privados voltados à população de baixa renda (Gomes, 2011), além da maior quantidade de favelas e moradores em situação de favela (PLHIS, 2010; PLHIS, 2020). Além disso, é onde há a maior concentração populacional de baixa renda e autodeclarada preta ou parda da cidade (IBGE, 2010).

A instalação do aeroporto ocorreu em uma área remanescente da massa falida da Companhia Electro-Metallúrgica Brasileira S.A., adquirida pela Fazenda do Estado de São Paulo em setembro de 1933 (Scatena, 2022). Nessa época, o aeroporto era denominado Campo de Aviação do Tanquinho, e a Zona Norte, região onde foi implantado, já apresentava uma urbanização com características industriais, a exemplo da Cia. Electro-Metallúrgica Brasileira S.A., fundada no local em 1922, loteamentos operários, como a Vila Brasil, loteada em 1925, a Vila Elisa, de 1929, a Vila Operária, de 1940, vias de hierarquia elevada, como a Avenida Brasil, e infraestrutura ferroviária, como a Linha férrea São Paulo - Minas (SPM) e Estação Ferroviária Usina, localizados ao lado do aeroporto, ambas inauguradas em 1928.

A escolha do terreno do aeroporto está relacionada à família Uchôa, uma vez que um dos proprietários da Companhia Electro-Metallúrgica Brasileira S.A., Flávio de Mendonça Uchôa, era parente de Leovegildo Mendonça Vilela Uchôa, primeiro presidente do Aeroclube de Ribeirão Preto. Ressalta-se que, embora a área tenha sido adquirida pelo estado de São Paulo em 1933, seu uso permaneceu sob controle da família Uchôa, por meio do Aeroclube de Ribeirão Preto e do então denominado Campo de Aviação do Tanquinho (Scatena, 2022).

A partir de estudos de promoção da regularização fundiária de um núcleo urbano informal localizado ao lado do aeroporto (Santos et al, 2024), é possível constatar a complexidade da questão fundiária de infraestruturas antigas e de grande dimensão. Além da imprecisão histórica das transmissões do domínio do Aeroporto Leite Lopes e do número elevado de matrículas, há informações incompatíveis sobre a delimitação do perímetro da

infraestrutura, em comparação com a realidade espacial que se encontra. O Aeroporto Leite Lopes possui três matrículas distintas e complementares, registradas em oito transcrições, dispostas em dois cartórios. O domínio do imóvel foi da massa falida industrial para a Fazenda do Estado de São Paulo em 1933 e, em 1975, para o Município de Ribeirão Preto. As descrições imprecisas do perímetro são incompatíveis com o georreferenciamento, o que dificulta uma identificação do sítio aeroportuário.

O resgate histórico da formação fundiária do aeroporto e da urbanização da região onde se localiza é fundamental para a compreensão dos atuais conflitos entre o aeroporto e a cidade. Atualmente, o Aeroporto Leite Lopes encontra-se totalmente inserido na malha urbana do município, o que lhe confere regramentos específicos definidos por legislações urbanístico-ambientais, configurando-o tanto como um polo de desenvolvimento econômico quanto como um gerador de impactos socioambientais.

## IMPACTOS SÓCIO-AMBIENTAIS: O AEROPORTO E A REGULAÇÃO URBANÍSTICA E AMBIENTAL

Na escala municipal, nas décadas de 30, 40, 50 e 60, o Aeroporto Leite Lopes foi mencionado em mapas e em atos-lei que delimitam o perímetro urbano somente como um elemento urbano físico. Foi no ato nº 3.563 de 1978, que regulamentou o zoneamento industrial presente no Plano Diretor de Desenvolvimento Integrado de 1977, que surgiu um apontamento sobre o aeroporto em relação ao zoneamento industrial da época, enquanto zona especial "ZE-4 - Área da Zona Especial do Aeroporto" (Ribeirão Preto, 1978).

O ato-lei nº 3.928 de 1981, em seu artigo 2º, redefine o zoneamento industrial e estabelece que a região do Aeroporto Leite Lopes é uma Zona Industrial Mista (ZIM), reforçando a relação entre aeroporto e indústria:

> *Art. 2º (...)*
>
> *§ 1º - AS ZONAS INDUSTRIAIS MISTAS são aquelas internas ao perímetro urbano do município e que, na data da publicação*

*desta lei, já apresentam estabelecimentos industriais em funcionamento, sendo individualizadas e representadas pelas siglas:*

(...)

ZIM. 3 - Aeroporto e "*Parque Industrial Tanquinho*" (*Ribeirão Preto, 1981*)

Contudo, o impacto sobre a área urbanizada causada pelo aeroporto pode ser datado a partir da Lei nº 501 de 1995 (Plano Diretor de 1995), que apontou, em um único inciso, a questão do aeroporto, em um artigo sobre diretrizes viárias, estabelecendo uma nova localização para a infraestrutura para fora do perímetro urbano: "Art. 29 - Constituem diretrizes dos sistemas Viário, Cicloviário e de Circulação: (...) X – prever área para nova localização do aeroporto, externamente ao Anel Viário, visando menor interferência na área urbanizada" (Ribeirão Preto, 1995). O Plano Diretor de 1995 não apresenta justificativas para a inclusão do inciso. No entanto, Migliorini (2022) sugere que, por ter sido a primeira lei elaborada com participação popular em Ribeirão Preto, é provável que moradores do entorno do aeroporto tenham demandado tal previsão durante as audiências públicas.

A lei nº 1.616 de 2004, que criou o primeiro Código do Meio Ambiente da cidade, aprofundou e desenvolveu os artigos de cunho ambiental do Plano Diretor de 1995. Os impactos previstos no Código do Meio Ambiente dizem respeito a dois pontos: regramentos de uso do solo na região do aeroporto, devido à sua localização sobre a zona de recarga do Aquífero Guarani (art. 84 e inciso III do art. 150) e impactos sonoros, com a previsão de elaboração de um Plano de Zoneamento de Ruídos do Aeroporto Leite Lopes, incluindo medidas mitigadoras (art. 221).

O artigo 221 nunca foi regulamentado, e o Plano de Zoneamento de Ruídos do Aeroporto Leite Lopes não foi elaborado. Ainda assim, fica evidente que os conflitos urbano-ambientais associados ao aeroporto estão relacionados aos impactos sociais e ambientais decorrentes dos ruídos aeronáuticos. Uma das decorrências da ausência desse plano foi o surgimento de ações de movimentos sociais e associações de bairro voltadas ao abatimento

do Imposto Predial e Territorial Urbano (IPTU) em seus imóveis (Scatena, 2022). Todavia, o Código do Meio Ambiente é um marco para o Aeroporto Leite Lopes, pois é a primeira legislação a reconhecer formalmente a importância das questões ambientais e dos impactos de ruídos aeronáuticos como elemento prioritário.

A lei nº 2.157 de 2007, que instituiu a Lei de Parcelamento, Uso e Ocupação do Solo (LPUOS 2007), revogou o inciso X do artigo 29 do Plano Diretor de 1995, permitindo, portanto, a permanência do aeroporto em sua localização. A mesma legislação também classificou o aeroporto como uma Área Especial de Aeroportos (AEA), sujeita a restrições ambientais. Essa classificação está prevista no artigo 7º, segundo o qual tais áreas são "sujeitas a limitações urbanísticas específicas, além daquelas incidentes nas macrozonas em que se encontrem localizadas", com ênfase nas especificidades relativas aos impactos sociais e ambientais causados pelos ruídos sonoros.

Além disso, o artigo 6º da LPUOS 2007 reafirma o enquadramento do aeroporto na Zona de Urbanização Restrita (ZUR), em função das questões ambientais associadas à sua localização sobre a área de recarga e afloramento do Aquífero Guarani. Assim, conforme estabelecido pela LPUOS 2007, o aeroporto foi definido como uma área especial inserida em um macrozoneamento também restritivo: o primeiro, devido às Curvas de Ruído; o segundo, por sua posição sobre a zona de recarga do aquífero.

Somente em 2018 foi instituído um novo marco legal, com o objetivo de incentivar o crescimento e o desenvolvimento da infraestrutura aeroportuária. A Lei nº 2.866 de 2018 (Plano Diretor 2018), alterou significativamente os dispositivos relativos ao Aeroporto Leite Lopes e à sua região. O artigo 53 estabelece "(...) VIII - estimular a consolidação de uma zona aeroportuária e logística no entorno do Aeroporto Leite Lopes" (Ribeirão Preto, 2018). Trata-se, também, da primeira legislação a reconhecer o Aeroporto Leite Lopes como um agente de desenvolvimento empresarial, articulando-o às infraestruturas viária, rodoviária e ferroviária, com base no papel regional e metropolitano do município.

A Lei nº 3.175 de 2023, que instituiu o novo Plano de Parcelamento, Uso e Ocupação do Solo (LPUOS 2023), consolida o

aeroporto como um agente de transformação territorial, em razão de suas características e potencialidades. A legislação o classifica como Unidade de Ocupação Planejada 03 – Aeroporto (UOP 03-AER), conforme os artigos 6º e 9º, e institui a Zona Especial Aeroportuária (ZEA), com diretrizes específicas para seu uso e ocupação:

> *"atender às restrições específicas do órgão da aeronáutica, sendo prevista a transformação em terminal aeroportuário internacional de carga, sujeita aos objetivos e diretrizes da Unidade de Ocupação Planejada Aeroporto, devendo-se observar as disposições da zona de proteção de aeródromo e do Plano de Zoneamento de Ruídos regulados no âmbito federal" (Inciso I do Art. 20. Ribeirão Preto, 2023).*

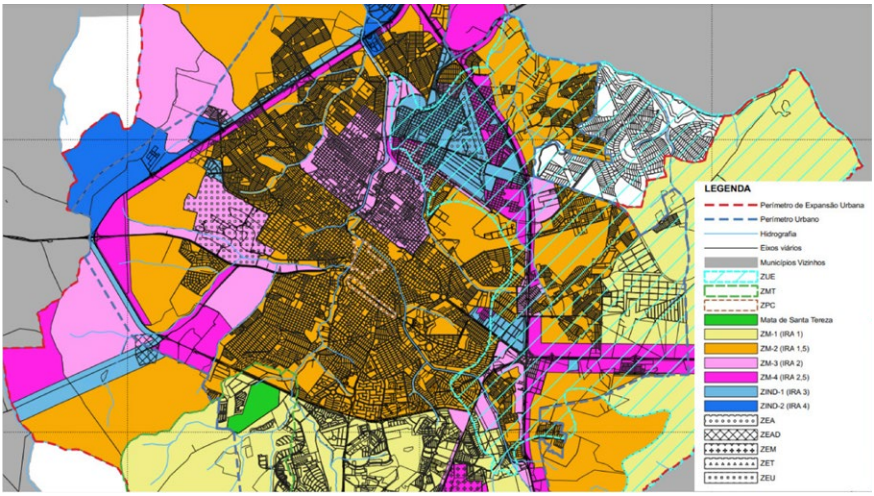



**Figura 2:** Mapa 04 - Zoneamento Urbanístico da Lei de Parcelamento, Uso e Ocupação do Solo de 2023. *Fonte: Alterado a partir de Ribeirão Preto (2023).*

Além das disposições e definições relacionadas à Unidade de Ocupação Planejada 03 – Aeroporto (UOP 03-AER) e à Zona Especial Aeroportuária (ZEA), o inciso II do artigo 35 da LPUOS 2023 estabelece que os "conflitos e sobreposições de zonas" referentes ao aeroporto deverão ser solucionados com base na legislação e regu-

lamentação federal e estadual, especialmente nas determinações do Comando da Aeronáutica e na legislação ambiental aplicável ao zoneamento do município.

## PROJETO RAO - INTERNACIONAL, MUDANÇA DO USO DO SOLO E CONFLITOS SOCIAIS

O processo recente de valorização das terras no entorno do aeroporto é consequência do projeto de internacionalização e ampliação da pista de pouso e decolagem do Aeroporto Leite Lopes (Projeto RAO - Internacional), iniciado na primeira metade dos anos 2010, e também de mudanças do uso do solo via Plano Diretor 2018 e LPUOS 2023. Ainda que os planos de expansão da infraestrutura aeroportuária tenham fracassado — em especial a proposta de ampliação da pista de pouso e decolagem de 2.100 para 3.500 metros (Scatena, 2022) —, a Prefeitura Municipal de Ribeirão Preto e a Rede Voa, concessionária responsável pela gestão do aeroporto, divulgaram que a internacionalização ocorrerá no início do ano de 2026, mesmo sem ampliação da pista de pouso e decolagem ou do sítio aeroportuário.

Esses fatores movimentaram o mercado imobiliário, gerando uma situação de especulação e valorização de terras na história recente de urbanização da região do Aeroporto Leite Lopes. O primeiro momento ocorreu na primeira metade dos anos 2010, com aumento de processos de reintegração de posse de áreas públicas municipais e áreas particulares, onde estavam sediadas favelas, que tinham funções de moradia para famílias pobres e negras (Santos, 2015; Rizzatti, 2020; Scatena, 2022). O segundo momento se deu após o ano de 2020, com o aumento de instalações de empreendimentos logísticos na região do aeroporto, devido aos incentivos que o Plano Diretor 2018 e a LPUOS 2023 forneceram.

O primeiro momento é exemplificado pela política de desfavelamento, iniciada em 2009 e intensificada no primeiro quinquênio da década de 2010. Essa política foi desenvolvida durante a gestão da prefeita Dárcy Vera, com atuação acentuada na região do Aeroporto Leite Lopes, especialmente sobre as favelas localizadas no entorno imediato do Aeroporto Leite Lopes (Funck; Severi, 2018).

As favelas Vila Elisa, Itápolis, Vila Brasil, Vila Zanetti, Tanquinho, Jardim Aeroporto, da Mata e Adamantina, todas vizinhas ao Leite Lopes, foram alvo dessa política. Segundo dados apresentados pela Prefeitura, cerca de 16 mil pessoas foram removidas e reassentadas em, aproximadamente, 3.600 unidades habitacionais situadas em outras regiões da cidade. Destas, cerca de mil unidades foram destinadas exclusivamente a moradores de favelas oriundos da região do aeroporto, correspondendo a quase um terço do total previsto pelo PLHIS 2010, tendo as remoções sido justificadas por suas localizações em zonas de ruído aeronáutico, classificadas como áreas de risco (Scatena, 2022).

Ainda nesse primeiro momento, verifica-se o aumento da expulsão de moradores de favelas da região por meio de ações de reintegração de posse de áreas privadas. Em julho de 2011, ocorreu a reintegração de posse contra a favela da Família, marcada pelo uso extremo da força policial. A ocupação estava situada em terreno particular na região do Aeroporto Leite Lopes e abrigava cerca de 150 famílias, totalizando, aproximadamente, 600 pessoas.

**Figura 3:** Localização das favelas próximas ao aeroporto de acordo com o PLHIS 2019-2029. *Fonte: Adaptado a partir de Scatena (2022).*

No início de 2014, as empresas San Marino Empreendimentos Imobiliários LTDA e Stéfani Nogueira Engenharia LTDA— representantes ilegítimas dos proprietários de uma área ocupada por duas favelas (Santos, 2015) — ingressaram com ação judicial de reintegração de posse. Na petição inicial, os próprios advogados dessas empresas alegaram prejuízos econômicos decorrentes do anúncio da internacionalização do aeroporto, baseando-se no Projeto RAO - Internacional (Scatena, 2022), o que evidencia um processo de especulação imobiliária sobre o terreno, que havia sido abandonado por décadas. Esse abandono foi comprovado por meio de um Termo de Ajustamento de Conduta (TAC) firmado entre o Ministério Público e os proprietários da área em 2011 (Scatena, 2022).

Outro ponto central da argumentação apresentada pelos advogados das empresas Stéfani Nogueira e San Marino foi o de que, segundo a Portaria nº 0629 de 1984 do Comando da Aeronáutica, na referida área só seriam permitidos usos comerciais ou industriais. Assim, a zona de ruído, que deveria servir como um instrumento de garantia de segurança e qualidade de vida dos moradores do entorno do Aeroporto Leite Lopes, passou a ser utilizada como argumento jurídico contra esses moradores. Isso transferiu a responsabilidade pelo conflito fundiário e ambiental à população vulnerabilizada, isentando o Poder Público municipal e estadual, que não prestaram a devida assistência aos assentamentos formais e informais da região, tampouco elaboraram o Plano de Zoneamento de Ruídos do Aeroporto Leite Lopes, cuja criação é uma exigência legal.

O segundo momento é mais recente, iniciado após a aprovação do Plano Diretor de 2018. A implantação de grandes loteamentos logísticos na região do Aeroporto Leite Lopes é exemplificada pelos empreendimentos LOG Ribeirão Preto, aprovados em 2022 (Figura 3), e o Empreendimento Logístico G4 Aeroporto (ainda em fase de aprovação), ambos localizados no subsetor N-14. O LOG Ribeirão é composto por uma área comercializada de 112.354,15 m² e uma área total de 225.440,54 m², já construído e visualizável por meio de imagens de satélite. O Empreendimento Logístico G4 Aeroporto será instalado no antigo Jóquei Clube, com área total de 341.323,45 m² e área construída de 188.765,47 m².

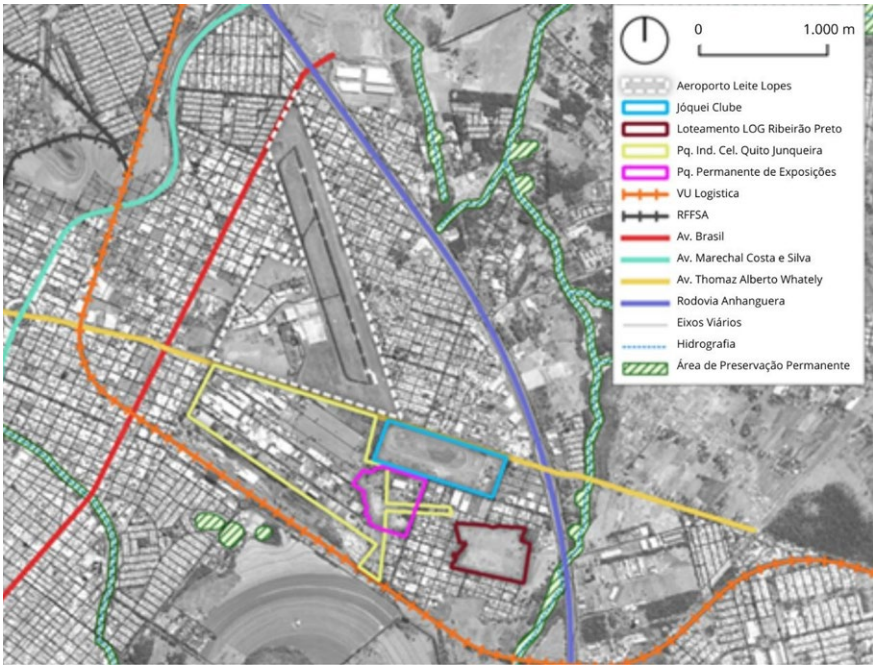



**Figura 4:** Caracterização de elementos urbanos próximos ao Aeroporto Leite Lopes. *Fonte: Adaptado a partir de Scatena (2022).*

Portanto, mesmo com todo o arcabouço de planejamento voltado à mitigação de impactos previsto nas legislações urbanístico-ambientais, os instrumentos legais não foram devidamente aplicados, e os conflitos inerentes às relações entre infraestrutura e cidade vêm se acentuando. Além da não elaboração e implementação do Plano de Zoneamento de Ruídos do Aeroporto Leite Lopes e da fiscalização ineficaz sobre os empreendimentos estabelecidos na zona de recarga do Aquífero Guarani, a infraestrutura aeroportuária, associada à Rodovia Anhanguera, tem atuado como um agente de valorização fundiária voltada ao capital imobiliário, sobretudo para empreendimentos do setor logístico.

Ambos os empreendimentos tendem a gerar impactos significativos sobre a paisagem urbana, a drenagem, o sistema viário e as infraestruturas locais, conforme indicam seus respectivos Estudos de Impacto de Vizinhança (EIVs), disponíveis no site da Secretaria de Planejamento e Desenvolvimento Urbano da Prefeitura Municipal de Ribeirão Preto.

## CONCLUSÕES

O capítulo se propôs a analisar a relação histórica entre o Aeroporto Leite Lopes e a cidade de Ribeirão Preto, SP, a partir de quatro eixos de leitura: (i) a formação da infraestrutura aeroportuária e as complexas questões fundiárias relacionadas à história da infraestrutura, datada de 1933; (ii) os impactos socioambientais revelados na dinâmica de produção das legislações urbanístico-ambientais em relação ao aeroporto e à sua região, atravessadas por instrumentos de planejamento que não se articulam entre si e se acumulam de forma desorganizada; (iii) o processo de valorização da terra, ancorados pelas alterações do uso do solo e projetos relacionados à infraestrutura; e (iv) os conflitos sociais expressados nas remoções decorrentes do processo histórico de desvalorização e posterior valorização fundiária.

O Aeroporto Leite Lopes constitui uma infraestrutura essencial para o atual momento econômico, relacionado ao transporte de produtos de alto valor agregado e à conexão de pessoas, funcionando como potencializador de relações tanto na escala urbana quanto nacional. Caso se concretize a internacionalização, a ampliação de sua escala será exponencial. Quando associado aos atuais empreendimentos logísticos, indústrias e de outras infraestruturas viárias, notadamente a Rodovia Anhanguera, observa-se um aumento no número de vagas de trabalho e o surgimento de novas demandas do setor econômico, como a atração de empresas, indústrias de alta tecnologia e centros de pesquisa e inovação.

Contudo, os impactos gerados na cidade, especialmente em sua região de influência e no solo ocupado pela infraestrutura, constituem os principais elementos que devem ser observados e mitigados por meio da ação do Poder Público municipal. Para que se alcance a mitigação ou eliminação desses conflitos, é imprescindível analisar as desconexões e contradições históricas que os originaram ou intensificaram, notadamente no que se refere à regulação do uso do solo, articulada com as legislações urbanístico-ambientais e com os instrumentos de planejamento municipal.

Na tabela a seguir apresenta-se um resumo dos problemas identificados, suas consequências em forma de conflitos e as res-

pectivas propostas de mitigação, com o objetivo de promover a resiliência social e ambiental que a cidade demanda.

| Nº | Situação problema | Conflitos | Resiliência |
|---|---|---|---|
| 1 | Complexidade da questão fundiária expressa nas matrículas da infraestrutura aeroportuária. | Aumento de custos financeiros, de tempo e de trabalho para a regularização fundiária de áreas confrontantes. | Regularização da matrícula do sítio aeroportuário, notadamente em relação ao seu georreferenciamento |
| 2 | Alto número de habitações em situação de favelas na região do aeroporto. | Acionamento do sistema de justiça, por meio de ações judiciais que podem gerar remoções forçadas, muitas vezes de forma violenta. | Regularização Fundiária Plena das favelas da região. Em imóveis que não é possível promover a regularização, reassentar as famílias para habitações em locais próximos e servidos de infraestrutura e equipamentos públicos. |
| 3 | Impactos sonoros, decorrentes de ruídos aeronáuticos que causam problemas de saúde e ambiental, além de impactos nas estruturas de edifícios. | Acionamento do sistema de justiça, por meio de ações judiciais de movimentos sociais, moradores e associações de bairro. | - Criação de espaços fixos localizados no Aeroporto ou no seu entorno, com o objetivo de promover reuniões de moradores em articulação com a concessionária e o Poder Público.<br>- Elaboração e aplicação do Plano de Zoneamento de Ruídos do Aeroporto Leite Lopes.<br>- Abatimento do IPTU no entorno da infraestrutura e soluções de mitigação do ruído aeronáutico. |
| 4 | Impactos sobre a área de recarga do Aquífero Guarani pelo aeroporto e pelas indústrias e empreendimentos logísticos atraídos por ele. | - Contaminação do Aquífero Guarani e do lençol freático.<br>- Extração de água do subsolo em volume que extrapola a recarga do lençol freático. | - Aplicação dos instrumentos previstos no Código de Meio Ambiente.<br>- Fiscalização de indústrias e empreendimentos logísticos em relação à extração de água do subsolo. |
| 5 | Descontinuidade e desconexão, quando não contradição, de legislações e planos municipais, notadamente urbanísticas e ambientais. | - Excesso e sobreposição de zoneamentos que dificultam a aplicação de Políticas Públicas e inibem investimentos privados.<br>- Promove desarticulação e descontinuidade de Políticas Públicas setoriais e intersetoriais.<br>- Dificulta e inibe a regulamentação de instrumentos de planejamento urbano e ambiental.<br>- Favorece a aplicação da lei para àqueles que detém capital econômico, político e técnico em detrimento de populações vulnerabilizadas. | - Democratização e reconhecimento da participação popular nas tomadas de decisões sobre as alterações legais.<br>- Valorização do embasamento técnico e científico na orientação das legislações e planos.<br>- Periodicidade das revisões legais.<br>- Articulação entre secretarias municipais e articulação com outras esferas de governo. |

| N° | Situação problema | Conflitos | Resiliência |
|---|---|---|---|
| 6 | Valorização e desvalorização imobiliária decorrente de alterações do uso do solo e de anúncio da internacionalização. | Atração de empreendimentos que aumentam o custo da terra, acionam o sistema de justiça para promover reintegrações de posse e, consequentemente, expulsão de populações vulnerabilizadas. | Implantação de instrumentos urbanísticos já criados em forma de lei, notadamente oriundos do Plano Diretor de 2018 e do Estatuto das Cidades. |

**Tabela 1:** Sistematização de 6 situações problemas e seus conflitos, com propostas de mitigação. *Fonte: elaboração própria.*

O foco atribuído à relação entre o Aeroporto Leite Lopes e a cidade de Ribeirão Preto visa à identificação de soluções para questões e problemas historicamente gerados na interação entre infraestrutura e cidade. O resgate histórico da formação fundiária dessa infraestrutura, articulado à análise legal e às transformações no uso do solo, é fundamental para a compreensão dos impactos e conflitos que ocorrem na atualidade. A busca por soluções e estratégias de mitigação dos problemas atuais está inscrita nessa trajetória histórica.

A resiliência da infraestrutura dependerá da análise e discussão dessa relação, devendo-se concentrar, no caso do Aeroporto Leite Lopes, no planejamento urbano integrado ao seu entorno; na redução de vulnerabilidades — ambientais e sociais —, na valorização de instrumentos legais já existentes, especialmente os de natureza urbanístico-ambiental; e na democratização da cidade, por meio da participação e da influência de populações vulnerabilizadas nas tomadas de decisões relativas ao planejamento, à produção e à gestão da cidade. Assim, a resiliência, discutida a partir do Aeroporto Leite Lopes e de Ribeirão Preto, deve garantir que os benefícios gerados pela infraestrutura aeroportuária não se concretizem às custas do meio ambiente e das populações vulnerabilizadas.

## REFERÊNCIAS


CARDOSO, S. F.. **A saga dos aviadores**. Ribeirão Preto: Editora Legis Summa, 2000.

DOS SANTOS, D. B. **O papel da COHAB-RP na produção do espaço urbano em Ribeirão Preto (SP)**. 2017. Dissertação (mestrado) – Instituto de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2017.

DEMINICE, D. **A arte de se construir cidades em meio à política local**: Ribeirão Preto, 1890 - 1960. 2015. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2015.

FUNCK, Y. B.; SEVERI, F. C. Remoção e acumulação: análise dos processos de reintegração de posse promovidos pela Prefeitura de Ribeirão Preto. **Revista Brasileira de Direito Urbanístico – RBDU**, Belo Horizonte, ano 4, nº 6, p. 195-225, jan./jun. 2018.

GOMES, M. A. S. Desvelando o mito da "Califórnia": aspectos da desigualdade sócioespacial em Ribeirão Preto - SP. **Revista de Geografia**, Rio de Janeiro, v. 2, n. 1, 2011.

LARA, P. H. V.; ROSA, L. R. O. Café e Indústria em Ribeirão Preto: o caso da Electro-Metallúrgica Brasileira S.A (1921-1931). **Revista Dialogus** Ribeirão Preto, v. 5, n. 1, p. 319-338, 2009.

MIGLIORINI, V. L. B.. O processo de aprovação do Plano Diretor de 1995 como marco de alterações significativas na forma de planejar Ribeirão Preto. In: FARIA, R.; MIRANDA, A. L.; RIZZATTI, H. (org.). **Urbanismo e urbanização em Ribeirão Preto: história e desenvolvimento**. Brasília: Universidade de Brasília, Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, 2022.

RIZZATTI, H. **Urbanização corporativa vista pelo avesso:** Periferização, interseccionalidade e lugar – uma análise a partir das ocupações de terras urbanas. 2020. Tese (Doutorado) – Universidade Estadual de Campinas (Unicamp), Campinas, 2020.

SANTOS, A. C. M. dos. **Movimentos Populares de Luta por Moradia e Judicialização dos Conflitos Fundiários**: o caso da Favela

João Pessoa de Ribeirão Preto-SP na busca por Acesso à Justiça. Trabalho de Conclusão de Curso. Faculdade de Direito de Ribeirão Preto - FDRP/USP, 2015.

SANTOS, A. C. M; FIGUEIREDO, A. L. S.; SCATENA, T. P.; GOMEZ, R. S.; SANTOS, M. F. B.; MELO, B. M.; KANDRATAVICIUS, S.; SANTOS JUNIOR, E. R.; MARQUES, B. T.; BATISTA, A. C. S. **Estudo das Desconformidades Nazaré Paulista e João Pessoa**. 2024. Disponível em: <https://drive.google.com/file/d/1e6PtrfGDueJsDBTa6Kzpa81PkO8ajPfD/view> Acesso 10 de julho de 2025.

SANTOS JUNIOR, E. R.; SANTOS, A. C. M; FIGUEIREDO, A. L. S.; SCATENA, T. P.; GOMEZ, R. S.; SANTOS, M. F. B.; MELO, B. M.; KANDRATAVICIUS, S.; MARQUES, B. T.; BATISTA, A. C. S. **Estudo Prévio de Impacto de Vizinhança Reurb-S Nazaré Paulista e João Pessoa.** 2024. Disponível em: <https://drive.google.com/file/d/1h3JuqHEC2zj85n0m4tbcKKURsB1Wm-NJC/view> Acesso 10 de julho de 2025.

SCATENA, T. P. **Aeroporto Leite Lopes de Ribeirão Preto**: formação e conflitos em infraestrutura. Dissertação de mestrado. São Carlos. Instituto de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo (IAU/USP), 2022.

SILVA. A. C. B da. **Expansão urbana e formação dos territórios de pobreza em Ribeirão Preto**: os bairros surgidos a partir do núcleo colonial Antônio Prado (1887). 2008. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2008.

SILVA, A., ROSA, L. R. O.; SILVA, M. C. C.; REGISTRO, T. C. Filhos do Café – **Ribeirão Preto da Terra Roxa – Tradicional em ser moderna. Ribeirão Preto**: Fundação Instituto do Livro, 2010.

ZAMBONI, D. P. **A função social e a refuncionalização do território ferroviário da Cia Mogiana em Ribeirão Preto.** 2012. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Urbana, Universidade Federal de São Carlos – PPGEU/UFSCar, São Carlos, 2012.

## Legislação consultada


RIBEIRÃO PRETO. 1978. **Lei nº 3.563 de 18 de dezembro de 1978**. Dispõe sobre o Plano Diretor de Desenvolvimento Integrado - Organização Territorial - Zoneamento Industrial - Objetivos, definições, classificação, uso do solo, e dá outras providências. Ribeirão Preto - SP: 1978.

RIBEIRÃO PRETO. 1981. **Lei nº 3.928 de 27 de maio de 1981**. Dispõe sobre o zoneamento industrial do Município de Ribeirão Preto; cria o Conselho de Desenvolvimento Industrial e dá outras providências. Ribeirão Preto - SP: 1981.

RIBEIRÃO PRETO. 1995. **Lei complementar Nº 501 de 31 de outubro de 1995**. Dispõe sobre a instituição Plano Diretor no Município de Ribeirão Preto e dá outras providências. Ribeirão Preto - SP: 1995.

RIBEIRÃO PRETO. 2004. **Lei Nº 1.616 de 2 de fevereiro de 2004**. Institui o Código do Meio Ambiente, dispõe sobre o sistema Municipal de Administração da Qualidade, Proteção, Controle e Desenvolvimento do Meio Ambiente, e Uso Adequado dos Recursos Naturais - SIMA, os instrumentos da política ambiental e estabelece normas gerais para a administração da qualidade ambiental no Município de Ribeirão Preto. Ribeirão Preto - SP: 2004.

RIBEIRÃO PRETO. 2007. **Lei Complementar Nº 2.157 de 31 de janeiro de 2007**. Dispõe sobre o parcelamento, uso e ocupação do solo no município de Ribeirão Preto. Ribeirão Preto - SP: 2007.

RIBEIRÃO PRETO. **Lei nº 2.866, de 03 de maio de 2018**. Dispõe sobre a revisão do Plano Diretor implantado pela Lei Complementar nº 501, de 31 de outubro de 1995 e modificado pela Lei Complementar nº 1.573, de 13 de novembro de 2003, na forma que especifica, e dá outras providências. Ribeirão Preto - SP: 2018.

RIBEIRÃO PRETO. 2021. Anexo I Parte integrante da **Lei Complementar nº 3.052 de 2020** Política Municipal de Habitação de Interesse Social e Plano Local de Habitação de Interesse Social Ribeirão Preto 2020-2029. Ribeirão Preto - SP: 2021.

RIBEIRÃO PRETO. **Lei Complementar nº 3.175, de 17 de abril de 2023**. Disciplina o parcelamento, o uso e a ocupação do solo no município de Ribeirão Preto, de acordo com as diretrizes estabelecidas pela Lei Complementar nº 2.866, de 27 de abril de 2018, que dispõe sobre o Plano Diretor, e dá outras providências. Ribeirão Preto - SP: 2023.

8

# BETWEEN INFRASTRUCTURE AND THE CITY: LEITE LOPES AIRPORT IN RIBEIRÃO PRETO – LAND ISSUES, SOCIO-ENVIRONMENTAL IMPACTS, AND SOCIAL CONFLICTS

THIAGO PIZZO SCATENA

## SUMMARY

The focus of this chapter is the historical relationship between the Leite Lopes Airport and the city of Ribeirão Preto, São Paulo, analyzed through the land history of the airport infrastructure; land use and its changes resulting from urban and environmental legislation; the project to internationalize Leite Lopes Airport; the socio-environmental impacts that the infrastructure has on its immediate surroundings and on the land it occupies; and the social conflicts arising from noise impacts and real estate appreciation. The objective is to present and analyze how the conflicts generated by this relationship can be mitigated and/or resolved through legislation, plans, and instruments in the municipality, with the goal of promoting the social and environmental resilience that the city and its population demand from the infrastructure.

**Keywords**

Airport infrastructure; Ribeirão Preto; Conflicts.

DOI: 10.66949/w7d1k8p4

## INTRODUCTION

This chapter examines the relationship between Dr. Leite Lopes State Airport (Leite Lopes Airport) and the city of Ribeirão Preto, São Paulo. The analysis considers how the airport infrastructure influences and is influenced by the urbanization process, focusing on the following aspects: the complexity of land-use issues related to the development of the infrastructure; the socio-environmental impacts that this infrastructure has on its immediate surroundings and on the recharge zone of the Guarani Aquifer; and the growing conflict arising from the infrastructure's internationalization project, coupled with changes in land use in the region, notably in relation to the favelas located near the airport.

The objective of this study is to analyze the historical disconnection between land-use regulation – through urban and environmental legislation – and the impacts generated by airport infrastructure, particularly with regard to processes of land appreciation and depraciation. This disconnection is manifested in environmental impacts on the Guarani Aquifer System, in aircraft noise emissions affecting the airport's the surroundings, in litigated land conflicts, in the displacement of residents living near the the infrastructure, in the interruption and delay of investments in economic development, and in the discontinuity public projects and policies. The study also aims to present proposed solutions and mitigation strategies designed to promote environmental and social resilience, in line with the specific focus of this study.

Leite Lopes was the airport with the highest passenger flow managed by the São Paulo State Aviation Department (Departamento Aeroviário do Estado de São Paulo – DAESP) until its management was handed over to the private sector in April 2022, to the Brazilian private consortium Rede Voa. It is the fourth largest airport in terms of passenger traffic in the state of São Paulo, behind Cumbica, Congonhas and Viracopos airports. Its internal infrastructure includes 15 hangars and cargo terminals, a restaurant, a fire station, aviation fueling stations operated by BR Aviation and AIR BP, a control tower, a meteorological garden, a MAER antenna, KF power cabins, KC/KT radars, and a two-story passenger ter-

minal with 5,000 m² of covered area. The runway measures 2,100 meters by 45 meters and accommodates aircraft such as the Airbus A320, operated by the Azul and TAM; the E195, operated by Azul; the E190, operated by TAM; and the ATR72, operated by Azul and Companhia Passaredo.

**Figure 1:** Polygon of Leite Lopes Airport in yellow, highlighting forms of occupation in its surroundings. *Source: Prepared by the authors from a Google Earth satellite image of July 30, 2025.*

## FORMAÇÃO DO AEROPORTO LEITE LOPES: A QUESTÃO FUNDIÁRIA E URBANIZAÇÃO DA SUA REGIÃO

Leite Lopes Airport is located in the North Zone of the city of Ribeirão Preto (Figure 1), a region that has historically been designated by the government and the private sector for working-class housing (Scatena, 2022). This is an area where urban facilities considered undesirable – such as factories, cemeteries, slaughterhouses, and asylum – were established (Silva, 2008). There is also a con-

centration of low-income housing complexes built by COHAB-RP (Dos Santos, 2017), private housing developments aimed at the low--income population (Gomes, 2011), as well as the largest number of favelas and residents living in favela-like conditions (PLHIS, 2010; PLHIS, 2020). Furthermore, it is home to the city's largest concentration of low-income residents who self-identify as Black or Mixed-race (IBGE, 2010).

The airport was built on land that had been part of the estate of the bankrupt Companhia Electro-Metallúrgica Brasileira S.A., which was acquired by the São Paulo State Treasury in September 1933 (Scatena, 2022). At that time, the airport was called Tanquinho Airfield, and the North Zone, the region where it was established, already exhibited urbanization with industrial characteristics, such as Electro-Metallúrgica Brasileira S.A. Company, founded there in 1922, workers' housing such as Vila Brasil developed in 1925, Vila Elisa, in 1929, Vila Operária, in 1940, major roads, such as Avenida Brasil; and railway infrastructure, such as the São Paulo - Minas Railway Line (SPM) and Usina Railway Station, located next to the airport, both inaugurated in 1928.

The choice of the airport site is linked to the Uchôa family, since one of the owners of Companhia Electro-Metallúrgica Brasileira S.A., Flávio de Mendonça Uchôa, was a relative of Leovegildo Mendonça Vilela Uchôa, the first president of the Ribeirão Preto Aeroclub. It should be noted that, although the area was acquired by the state of São Paulo in 1933, its use remained under the control of the Uchôa family, through the Ribeirão Preto Aeroclub and the then-named Tanquinho Airfield (Scatena, 2022).

Based on studies promoting land regularization in an informal urban sttlement located next to the airport (Santos et al, 2024), it is possible to observe the complexity of land issues surrounding large, older infrastructure projects. In addition to the historical imprecision of the transfers of ownership of Leite Lopes Airport and the high number of property registrations, there is conflicting information regarding the demarcation of the infrastructure's perimeter, compared to the actual spatial reality on the ground. Leite Lopes Airport has three distinct and complementary registrations, recorded in eight deeds, held at two registry offices. The ownership

of the property passed from the industrial bankruptcy estate to the São Paulo State Treasury in 1933 and, in 1975, to the Municipality of Ribeirão Preto. The imprecise descriptions of the perimeter are incompatible with georeferencing, which makes it difficult to identify the airport site.

A historical review of the airport's land development and the urbanization of the surrounding area is essential to understanding the current conflicts between the airport and the city. Currently, Leite Lopes Airport is fully integrated in the municipality's urban fabric, which subjects it to specific regulations defined by urban and environmental legislation, positioning it both as a hub of economic development and as a source of socio-environmental impacts.

## SOCIO-ENVIRONMENTAL IMPACTS : THE AIRPORT AND URBAN AND ENVIRONMENTAL REGULATION

At the municipal level, during the 1930s, 1940s, 1950s and 1960s, Leite Lopes Airport was mentioned on maps and in legislative acts defining the urban perimeter solely as a physical urban feature. It was in Act No. 3,563 of 1978, which regulated the industrial zoning provisions of the 1977 Integrated Development Master Plan, that a reference about the airport appeared in relation to the industrial zoning of the time, as a special zone "ZE-4 - Area of the Special Zone of the Airport" (Ribeirão Preto, 1978).

Article 2 of Decree-Law No. 3,928 of 1981 redefines industrial zoning and establishes that the Leite Lopes Airport area is a Mixed-Use Industrial Zone (ZIM), reinforcing the relationship between airport and industry:

> *Article 2* (...)
>
> *Paragraph 1 – MIXED-USE INDUSTRIAL ZONES are those within the urban perimeter of the municipality and which, on the date of publication of this law, already have industrial establishments in operation, being individualized and represented by the acronyms:*
>
> (...)

*ZIM. 3 - Airport and "Tanquinho Industrial Park" (Ribeirão Preto, 1981)*

However, the impact of the airport on the urbanized area can be traced back to Law No. 501 of 1995 (1995 Master Plan), which addressed the issue of the airport in a single clause within an article on transportation guidelines, establishing a new location for the infrastructure outside the urban perimeter: "Art. 29 - The following are guidelines for road systems, Cycling and Circulation: (...) X – to provide an area for a new location of the airport, outside the Ring Road, aiming at less interference in the urbanized area" (Ribeirão Preto, 1995). The 1995 Master Plan does not provide justifications for the inclusion of this clause. However, Migliorini (2022) suggests that, since it was the first law drafted with popular participation in Ribeirão Preto, it is likely that residents of the airport's surroundings demanded such a provision during the public hearings.

Law No. 1,616 of 2004, which established the city's first Environmental Code, expanded upon and developed the environmental provisions of the 1995 Master Plan. The impacts addressed in the Environmental Code concern two points: land use regulations in the airport area, due to its location within the recharge zone of the Guarani Aquifer (Art. 84 and item III of Art. 150) and noise impacts, with provisions for the development of a Noise Zoning Plan for Leite Lopes Airport, including mitigating measures (art. 221).

Article 221 was never implemented, and the Noise Zoning Plan for Leite Lopes Airport was never drafted. Nevertheless, it is clear that the urban-environmental conflicts associated with the airport are linked to the social and environmental impacts resulting from aircraft noise. One consequence of the absence of this plan was the emergence of actions by social movements and neighborhood associations aimed at reducing the Urban Property and Land Tax (Imposto Predial e Territorial Urbano – IPTU) on their properties (Scatena, 2022). However, the Environmental Code is a milestone for Leite Lopes Airport, as it is the first legislation to

formally recognize the importance of environmental issues and the impacts of aircraft noise as a priority.

Law No. 2,157 of 2007, which established the Law on Land Subdivision, Use and Occupancy (Lei de Parcelamento, Uso e Ocupação do Solo – LPUOS, 2007), revoked item X of article 29 of the 1995 Master Plan, thereby allowing the airport to remain at its current location. The same legislation also classified the airport as a Special Airport Area (Área Especial de Aeroportos – AEA), subject to environmental restrictions. This classification is provided for in article 7, according to which such areas are "subject to specific urban planning limitations, in addition to those applicable to the macro-zones in which they are located," with emphasis on the specificities related to the social and environmental impacts caused by noise.

In addition, Article 6 of the LPUOS 2007 reaffirms the airport's classification within the Restricted Urbanization Zone (ZUR), due to environmental concerns associated with its location over the recharge and outcrop area of the Guarani Aquifer. Thus, as established by the LPUOS 2007, the airport was designated as a special area within in a similarly restrictive macro-zoning framework: the first, due to the noise curves; the second, due to its position over the aquifer's recharge zone.

It was not until 2018 that a new legal framework was established, with the aim of promoting the growth and development of airport infrastructure. Law No. 2,866 of 2018 (2018 Master Plan) significantly amended the provisions relating to Leite Lopes Airport and its surrounding region. Article 53 establishes "(...) VIII - stimulate the consolidation of an airport and logistics zone around Leite Lopes Airport" (Ribeirão Preto, 2018). It is also the first legislation to recognize Leite Lopes Airport as an agent of business development, linking it with road, highway, and rail infrastructure, based on the municipality's regional and metropolitan role.

Law No. 3,175 of 2023, which established the new Land Subdivision, Use, and Occupation Plan (LPUOS 2023), positions the airport as a driver of territorial transformation, given its characteristics and potential. The legislation classifies it as Planned

Occupation Unit 03 – Airport (UOP 03-AER), in accordance with Articles 6 and 9, and establishes the Special Airport Zone (ZEA), with specific guidelines for its use and occupation:

> *comply with the specific restrictions of the aeronautical agency, being foreseen the transformation into an international airport cargo terminal, subject to the objectives and guidelines of the Airport Planned Occupation Unit, and the provisions of the aerodrome protection zone and the Noise Zoning Plan regulated at the federal level must be observed"* (*Item I of Art. 20. Ribeirão Preto, 2023*).

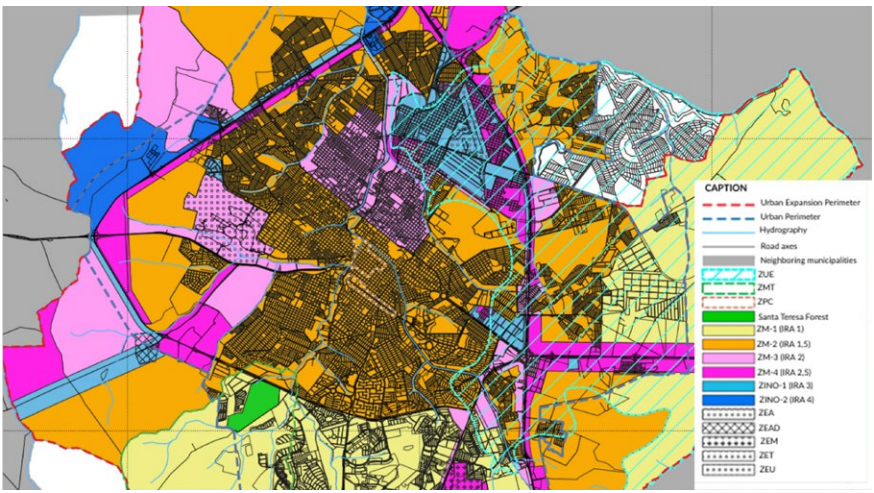



**Figure 2:** Map 04 - Urban Zoning of the 2023 Land Parceling, Use and Occupation Law. *Source: Adapted from Ribeirão Preto (2023).*

In addition to the provisions and definitions related to Planned Land Use Unit 03 – Airport (UOP 03-AER) and the Special Airport Zone (ZEA), subsection II of Article 35 of LPUOS 2023 establishes that "conflicts and overlaps between zones" pertaining to the airport must be resolved based on federal and state laws and regulations, particularly the provisions of the Air Force Command and the environmental legislation applicable to the municipality's zoning.

## RAO PROJECT - INTERNATIONAL, LAND USE CHANGE AND SOCIAL CONFLICTS

The recent rise in land values around the airport is a result of the project to internationalize and expand the runway at Leite Lopes Airport (RAO Project - International), which began in the first half of the 2010s, as well as changes in land use under the 2018 Master Plan and the 2023 LPUOS. Although plans to expand the airport infrastructure have failed – particularly the proposal to expand the runway from 2,100 to 3,500 meters (Scatena, 2022) – , the City Hall of Ribeirão Preto and Rede Voa, the concessionaire responsible for managing the airport, announced that the airport will become international in early 2026, even without expanding the runway or the airport site.

These factors have driven the real estate market, leading to speculation and rising land values in the recent history of urbanization in the Leite Lopes Airport area. The first phase occurred in the first half of the 2010s, with an increase in repossession proceedings for municipal public areas and private lands where favelas were located, which served as housing for poor and Black families (Santos, 2015; Rizzatti, 2020; Scatena, 2022). The second phase occurred after 2020, with an increase in the establishment of logistics projects in the airport region, due to incentives provided by the 2018 Master Plan and the 2023 LPUOS.

The first phase is exemplified by the favela clearance, which began in 2009 and was intensified during the first five years of the 2010s. This policy was developed during Mayor Dárcy Vera administration, with a particular focus on the Leite Lopes Airport area, especially the favelas located in the immediate vicinity of Leite Lopes Airport (Funck; Severi, 2018). The favelas Vila Elisa, Itápolis, Vila Brasil, Vila Zanetti, Tanquinho, Jardim Aeroporto, da Mata and Adamantina, all neighboring Leite Lopes, were targeted by this policy. According to data presented by the City Hall, about 16,000 people were removed and resettled in roughly 3,600 housing units located in other parts of the city. Of these, about a 1,000 units were allocated exclusively for favela residents from the airport

area, corresponding to nearly a third of the total provided by the 2010 PLHIS, with the removals being justified by their locations in aircraft noise zones, classified as risk areas (Scatena, 2022).

Also in this initial phase, there was an increase in the eviction of favela's residents in the region through repossession actions on private lands. In July 2011, a repossession operation was carried out against the Família favela, marked by the excessive use of police force. The settlement was located on private land in the Leite Lopes Airport area and housed about 150 families, totaling approximately 600 people.

**Figure 3:** Location of favelas near the airport according to PLHIS 2019-2029.
*Source: Adapted from Scatena (2022).*

In early 2014, the companies San Marino Empreendimentos Imobiliários LTDA and Stéfani Nogueira Engenharia LTDA – unauthorized representatives of the owners of an area occupied by two favelas (Santos, 2015) – filed a lawsuit seeking repossession of the property. In the initial petition, the lawyers for these companies themselves alleged economic losses resulting from the announ-

cement of the airport's internationalization, based on the RAO - International Project (Scatena, 2022), which highlights a process of real estate speculation on the land, which had been abandoned for decades. This abandonment was confirmed by a Conduct Adjustment Agreement (Termo de Ajustamento de Conduta – TAC) signed between the Public Prosecutor's Office and the owners of the area in 2011 (Scatena, 2022).

Another key point in the argument presented by the lawyers for the companies Stéfani Nogueira and San Marino was that, according to Air Force Command Ordinance No. 0629 of 1984, only commercial or industrial uses would be permitted in that area. Thus, the noise zone, which as intended to serve as an instrument to ensure the safety and quality of life of residents living near Leite Lopes Airport, came to be used as a legal argument against those residents. This shifted the responsibility for the land and environmental conflict onto the vulnerable population, exempting the municipal and state governments, which failed to provide due assistance to the formal and informal settlements in the region, nor did they develop the Leite Lopes Airport Noise Zoning Plan, the creation of which is a legal requirement.

The second phase is more recent, having begun following the approval of the 2018 Master Plan. The development of large logistics subdivisions in the Leite Lopes Airport region is exemplified by the LOG Ribeirão Preto projects, approved in 2022 (Figure 3), and the G4 Airport Logistics Project (still in the approval phase), both located in subsector N-14. LOG Ribeirão consists of a commercial area of 112,354.15 m² and a total area of 225,440.54 m², already built and visible via satellite images. The G4 Airport Logistics Project will be located on the site of the former Jockey Club, with a total area of 341,323.45 m² and a built area of 188,765.47 m².

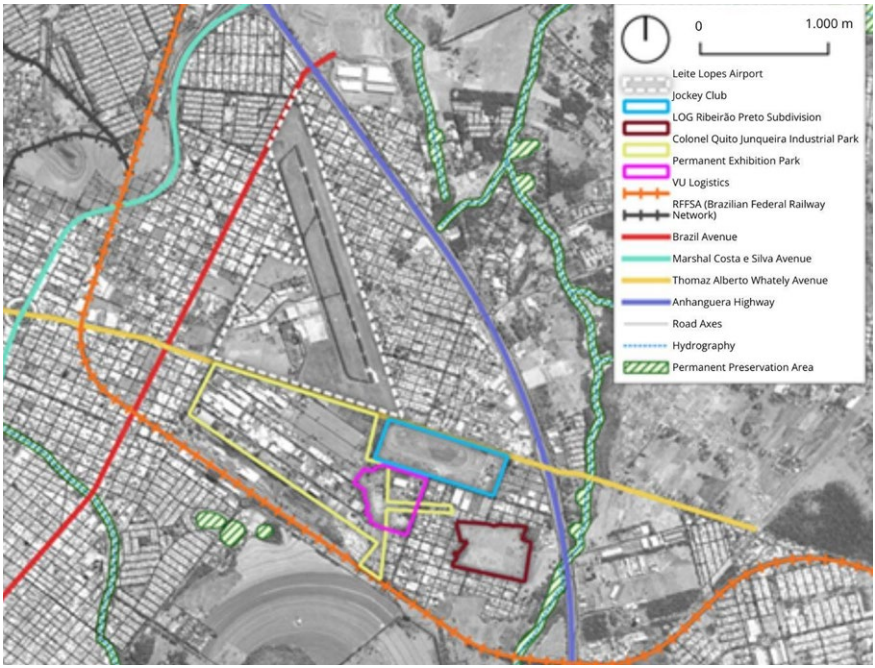



**Figure 4:** Characterization of urban elements near Leite Lopes Airport.
*Source: Adapted from Scatena (2022).*

Therefore, despite the comprehensive planning framework aimed at mitigating impacts as provided for in urban an environmental legislation, the legal instruments have not been properly enforced, and the conflicts inherent in the relationship between infrastructure and the city have been intensifying. In addition to failure to develop and implement the Leite Lopes Airport Noise Zoning Plan and the ineffective inspection of developments established in the Guarani Aquifer recharge zone, the airport infrastructure, in conjunction with the Anhanguera Highway, has acted as a driver of land value appreciation geared toward real estate capital, particularly for projects in the logistics sector.

Both projects are likely to have a significant impact on the urban landscape, drainage, the road system and local infrastructure, as indicated by their respective Neighborhood Impact Studies (Estudos de Impacto de Vizinhança – EIVs), which are available on the website of the Ribeirão Preto Municipal Government's Department of Planning and Urban Development.

## CONCLUSIONS

This chapter aimed to analyze the historical relationship between Leite Lopes Airport and the city of Ribeirão Preto, São Paulo, based on four main lines of inquiry: (i) the development of the airport's infrastructure and the complex land issues related to the its history, dating back to 1933; (ii) the socio-environmental impacts revealed in the dynamics of urban and environmental legislation regarding the airport and its surrounding region, which are marked by planning instruments that are not coordinated with one another and accumulate in a disorganized manner; (iii) the process of land appreciation, driven by changes in land use and infrastructure-related projects; and (iv) the social conflicts expressed in the evictions resulting from the historical process of land devaluation and subsequent appreciation.

Leite Lopes Airport is an essential piece of infrastructure for the current economic moment, given its role in transporting high--value-added goods and connecting people, serving as a catalyst for relationships at both the urban and national levels. If internationalization proceeds, the expansion of its scale will be exponential. When combined with current logistics projects, industries and other transportation infrastructures – notably the Anhanguera Highway – there will be an increase in job opportunities and the emergence of new demands from the economic sector, such as the attraction of companies, high-tech industries, and research and innovation centers.

However, the impacts on the city – especially within its area of influence and on the land occupied by infrastructure—are the main elements that must be addressed and mitigated through the action of the municipal government. To mitigate or eliminate these conflicts, it is essential to analyze the historical disconnections and contradictions that originated or intensified them, particularly with regard to land-use regulation, in conjunction with urban and environmental legislation and municipal planning instruments.

The following table presents a summary of the identified problems, their consequences in the form of conflicts, and the cor-

responding mitigation proposals, with the objective of promoting the social and environmental resilience that the city requires.

| N° | Problem | Conflicts | Resilience |
|---|---|---|---|
| 1 | Complexity of the land issue expressed in the airport infrastructure registrations. | Increased financial, time and labor costs for land regularization of adjacent areas. | Regularization of the airport's site registration, particularly regarding its georeferencing. |
| 2 | High number of housings in favelas in the airport area. | Involvement of the justice system through legal actions that may result in forced evictions, often carried out violently. | Full land regularization of the favelas in the region. For properties where regularization it is not possible, resettle families into housing in nearby locations with access to infrastructure and public facilities. |
| 3 | Noise impacts, resulting from aircraft noise that causes health and environmental problems, as well as impacts on building structures. | Engaging the justice system through legal actions by social movements, residents, and neighborhood associations. | - Creation of permanent spaces located either at the airport or in its surroundings, with the objective of facilitate resident meetings in coordination with the concessionaire and government authorities.<br>- Development and implementation of the Leite Lopes Airport Noise Zoning Plan.<br>- Reduction of property taxes (IPTU) in the vicinity of the infrastructure and solutions for mitigating aircraft noise. |
| 4 | Impacts on the recharge area of the Guarani Aquifer caused by the airport and by the industries and logistics enterprises attracted by it. | - Contamination of the Guarani Aquifer and the water table.<br>- Extraction of groundwater in volumes that exceeds the recharge of the water table. | - Enforcement of the instruments provided for in the Environmental Code.<br>- Inspection of industries and logistics enterprises regarding groundwater extraction. |
| 5 | Discontinuity and disconnect – if not outright contradiction – between municipal laws and plans, particularly urban planning and environmental ones. | - Excessive and overlapping zoning regulations that hinder the implementation of public policies and discourage private investment.<br>- It leads to a lack of coordination and discontinuity in sectoral and intersectoral public policies.<br>- It hinders and inhibits the regulation of urban and environmental planning instruments.<br>- It favors the application of the law in favor of those who hold economic, political, and technical capital, to the detriment of vulnerable populations. | - Democratization and recognition of public participation in decision-making regarding legal changes.<br>- Emphasis on technical and scientific foundations in guiding legislation and plans.<br>- Regular legal reviews.<br>- Coordination among municipal departments and coordination with other levels of government. |

| N° | Problem | Conflicts | Resilience |
|---|---|---|---|
| 6 | - Real estate appreciation and depreciation resulting from land-use changes and announcements of internationalization. | Attraction of developments that increase land costs, trigger the judicial system to facilitate repossession proceedings, and consequently lead to the eviction of vulnerable populations. | Implementation of urban planning instruments already established by law, notably those derived from the 2018 Master Plan and the City Statute |

**Table 1:** Systematization of 6 problem situations and their conflicts, with mitigation proposals. *Source: prepared by the authors.*

The focus on the relationship between the Leite Lopes Airport and the city of Ribeirão Preto aims to identify solutions to issues and problems that have historically arisen from the interaction between infrastructure and the city. A historical examination of the land formation of this infrastructure, combined with a legal analysis and an examination of changes in land use, is essential for understanding the impacts and conflicts occuring today. The search for solutions and strategies to mitigate current problems is embedded in this historical trajectory.

The resilience of the infrastructure will depend on the analysis and discussion of this relationship; in the case of the Leite Lopes Airport, the focus should be on urban planning integrated with its surroundings; on reducing vulnerabilities – both environmental and social – , on the valorization of existing legal instruments, especially those of an urban-environmental nature; and on the democratizating the city through the participation and influence of vulnerable populations in decision-making regarding the city's planning, development, and management. Thus, resilience, as discussed in the context of Leite Lopes Airport and Ribeirão Preto, must ensure that the benefits generated by airport infrastructure are not achieved at the expense of the environment and vulnerable populations.

## *REFERENCES*


CARDOSO, S. F.. **The saga of the aviators**. Ribeirão Preto: Editora Legis Summa, 2000.

DOS SANTOS, D. B. **The role of COHAB-RP in the production of urban space in Ribeirão Preto (SP)**. 2017. Dissertation (master's degree) – Institute of Architecture and Urbanism, University of São Paulo, São Carlos, 2017.

DEMINICE, D. **The art of building cities in the midst of local politics**: Ribeirão Preto, 1890 - 1960. 2015. Dissertation (Master's Degree) – Institute of Architecture and Urbanism, University of São Paulo, São Carlos, 2015.

FUNCK, Y. B.; SEVERI, F. C. Removal and accumulation: analysis of the repossession processes promoted by the City of Ribeirão Preto. B**razilian Journal of Urban Law – RBDU**, Belo Horizonte, year 4, nº 6, p. 195-225, jan./jun. 2018.

GOMES, M. A. S. Unveiling the myth of "California": aspects of socio-spatial inequality in Ribeirão Preto - SP. **Revista de Geografia**, Rio de Janeiro, v. 2, n. 1, 2011.

LARA, P. H. V.; ROSA, L. R. O. Coffee and Industry in Ribeirão Preto: the case of Electro-Metallúrgica Brasileira S.A (1921-1931). **Dialogus** Ribeirão Preto Magazine, v. 5, n. 1, p. 319-338, 2009.

MIGLIORINI, V. L. B.. The process of approval of the 1995 Master Plan as a milestone of significant changes in the way of planning Ribeirão Preto. In: FARIA, R.; MIRANDA, A. L.; RIZZATTI, H. (ed.). **Urbanism and urbanization in Ribeirão Preto: history and development**. Brasília: University of Brasilia, Faculty of Architecture and Urbanism, 2022.

RIZZATTI, H. **Corporate urbanization seen inside out:** Peripheralization, intersectionality and place – an analysis from the occupations of urban land. 2020. Thesis (Doctorate) – State University of Campinas (Unicamp), Campinas, 2020.

SANTOS, A. C. M. dos. **Popular Movements for the Struggle for Housing and Judicialization of Land Conflicts**: the case of the João Pessoa Favela in Ribeirão Preto-SP in the search for

Access to Justice. Course Completion Work. Ribeirão Preto Law School - FDRP/USP, 2015.

SANTOS, A. C. M; FIGUEIREDO, A. L. S.; SCATENA, T. P.; GOMEZ, R. S.; SANTOS, M. F. B.; MELO, B. M.; KANDRATAVICIUS, S.; SANTOS JUNIOR, E. R.; MARQUES, B. T.; BATISTA, A. C. S. **Study of Nonconformities Nazaré Paulista and João Pessoa**. 2024. Available at: <https://drive.google.com/file/d/1e6PtrfGDueJsDBTa6Kzpa81PkO8ajPfD/view> Accessed July 10, 2025.

SANTOS JUNIOR, E. R.; SANTOS, A. C. M; FIGUEIREDO, A. L. S.; SCATENA, T. P.; GOMEZ, R. S.; SANTOS, M. F. B.; MELO, B. M.; KANDRATAVICIUS, S.; MARQUES, B. T.; BATISTA, A. C. S. **Preliminary Study of Neighborhood Impact Reurb-S Nazaré Paulista and João Pessoa**. 2024. Available at: <https://drive.google.com/file/d/1h3JuqHEC2zj85n0m4tbcKKURsB1Wm-NJC/view> Accessed July 10, 2025.

SCATENA, T. P. **Leite Lopes Airport in Ribeirão Preto**: formation and conflicts in infrastructure. Master's thesis. São Carlos. Institute of Architecture and Urbanism of the University of São Paulo (IAU/USP), 2022.

SILVA. A. C. B da. **Urban expansion and formation of territories of poverty in Ribeirão Preto**: the neighborhoods that emerged from the colonial nucleus Antônio Prado (1887). 2008. Thesis (Doctorate) – Federal University of São Carlos, São Carlos, 2008.

SILVA, A., ROSA, L. R. O.; SILVA, M. C. C.; REGISTRO, T. C. Filhos do Café – **Ribeirão Preto da Terra Roxa – Traditional in being modern. Ribeirão Preto**: Fundação Instituto do Livro, 2010.

ZAMBONI, D. P. **The social function and the refunctionalization of the railway territory of Cia Mogiana in Ribeirão Preto**. 2012. Dissertation (Master's Degree) – Graduate Program in Urban Engineering, Federal University of São Carlos – PPGEU/UFSCar, São Carlos, 2012.

## Legislation consulted

RIBEIRÃO PRETO. 1978. **Law No. 3,563 of December 18, 1978**. Provides for the Master Plan for Integrated Development - Territorial Organization - Industrial Zoning - Objectives, definitions, classification, land use, and provides for other provisions. Ribeirão Preto - SP: 1978.

RIBEIRÃO PRETO. 1981. **Law No. 3,928 of May 27, 1981**. Provides for the industrial zoning of the Municipality of Ribeirão Preto; creates the Industrial Development Council and makes other provisions. Ribeirão Preto - SP: 1981.

RIBEIRÃO PRETO. 1995. **Complementary Law No. 501 of October 31, 1995**. Provides for the institution of the Master Plan in the Municipality of Ribeirão Preto and provides for other provisions. Ribeirão Preto - SP: 1995.

RIBEIRÃO PRETO. 2004. **Law No. 1,616 of February 2, 2004**. Establishes the Environmental Code, provides for the Municipal System for the Administration of Quality, Protection, Control and Development of the Environment, and Adequate Use of Natural Resources - SIMA, the instruments of environmental policy and establishes general rules for the administration of environmental quality in the Municipality of Ribeirão Preto. Ribeirão Preto - SP: 2004.

RIBEIRÃO PRETO. 2007. **Complementary Law No. 2,157 of January 31, 2007**. Provides for the subdivision, use and occupation of the land in the municipality of Ribeirão Preto. Ribeirão Preto - SP: 2007.

RIBEIRÃO PRETO. **Law No. 2,866, of May 3, 2018**. Provides for the revision of the Master Plan implemented by Complementary Law No. 501, of October 31, 1995 and modified by Complementary Law No. 1,573, of November 13, 2003, in the manner specified, and provides for other provisions. Ribeirão Preto - SP: 2018.

RIBEIRÃO PRETO. 2021. Annex I: Integral part of **Complementary Law No. 3,052, of 2020**, Municipal Social Interest Housing

Policy and Local Social Interest Housing Plan, Ribeirão Preto, 2020-2029. Ribeirão Preto - SP: 2021.

RIBEIRÃO PRETO. **Complementary Law No. 3,175, of April 17, 2023**. Regulates the subdivision, use and occupation of land in the municipality of Ribeirão Preto, in accordance with the guidelines established by Complementary Law No. 2,866, of April 27, 2018, which provides for the Master Plan, and provides for other provisions. Ribeirão Preto - SP: 2023.

9

# A RELAÇÃO RODOVIA X CIDADE: CONFLITOS E IMPACTOS NAS ÁREAS URBANIZADAS. O CASO DA RODOVIA BR- 262 EM MINAS GERAIS

MARÍLIA GASPAR DE SOUZA LIMA

## RESUMO

O texto tem como objetivo analisar a influência da rodovia e das obras de infraestrutura na estruturação do tecido urbano e na elaboração de políticas públicas de planejamento em diferentes escalas, através do estudo dos municípios localizados no eixo da BR-262, em Minas Gerais. A rodovia, que possui importância nacional, influencia a metropolização, a dispersão urbana, e passa por conflitos de escala na interseção com o tecido urbano. Os planos de planejamento municipal muitas vezes não integram as ações com a infraestrutura rodoviária, resultando em soluções setoriais, o que gera conflito na relação entre cidade e rodovia. A duplicação de trechos da BR-262 proporciona melhoria dos fluxos, mas aumenta a dependência e cria barreiras físicas ao tecido urbano, além de aumentar a poluição atmosférica e o número de acidentes. O estudo destaca a necessidade de políticas públicas integradas, que considerem as múltiplas escalas de influência das rodovias e que promovam o desenvolvimento sustentável, resiliente às mudanças climáticas e com planejamento urbano mais articulado.

### Palavras-chave

Rodovias; infraestrutura; escalas de planejamento; tecido urbano

## INTRODUÇÃO

Atualmente, com as transformações econômicas, culturais, avanço das tecnologias e das comunicações, passaram a vigorar novos fenômenos urbanos (Costa, 2017). Dentre eles está o processo de regionalização do cotidiano, no qual as trocas diárias deixam de ser apenas locais e passam a ser regionais. Essa realidade provoca o advento de um novo padrão de ordenamento territorial, que ocorre com a intensificação da dispersão urbana, a metropolização e os conflitos de escala. Esses fenômenos aumentam a dependência de um amplo sistema de infraestrutura viária para a mobilidade e produzem novas relações entre rodovias e cidades. No Brasil, onde o principal modal é o rodoviário, as linhas de transporte inter-regionais tornaram-se grandes vias expressas, e o uso ao redor das rodovias foi intensificado (Reis Filho, 2006).

O entendimento da influência da rodovia e das obras de infraestrutura na estruturação do tecido urbano e na elaboração de políticas públicas de planejamento em diferentes escalas nos municípios que estão às suas margens é o objetivo desse trabalho. Para isso, utilizou-se um percurso metodológico diverso, que possibilitou as análises aqui apresentadas. O trecho em estudo foi caracterizado a partir de indicadores urbanos, sociais, econômicos e ambientais e do estudo das influências regionais do REGIC – Região de Influência de Cidades. Definidos os municípios em que o estudo seria aprofundado, foram feitas análises comparativas históricas de imagens de satélite da evolução do tecido urbano, análise dos planos diretores, metropolitano e de outras legislações incidentes no território, além de entrevistas semiestruturadas com moradores dos trechos em estudo.

O trabalho tem como objeto de análise a BR-262, em específico o trecho do estado de Minas Gerais. A escolha justifica-se pela sua importância como eixo rodoviário de caráter nacional na estruturação territorial do Brasil. Ela está entre as dez mais extensas do país, com 2.394,40 km no sentido E-W, e abrange os estados de Mato Grosso do Sul, São Paulo, Minas Gerais e Espírito Santo. A BR-262 configura-se, portanto, como uma rodovia de ligação continental que é essencial para o escoamento da produção agropecuária no Brasil e na América do Sul.

Em Minas Gerais, a extensão da BR-262 é de 901,60 km. O trecho se inicia no entroncamento com a BR-153 – Transbrasiliana, no município de Comendador Gomes, atravessa 38 municípios e termina no entroncamento com a MG-329(A), na divisa com o estado do Espírito Santo, próximo à cidade de Martins Soares. A escolha desse trecho da rodovia se deu pela pluralidade social e econômica existente em seu território e, consequentemente, presente no trecho selecionado. O estado tem localização privilegiada: é o elo entre as macrorregiões Nordeste, Centro-Oeste e Sudeste, cujos índices de concentração populacional, de evolução socioeconômica e de renda apresentam grande variação.

O desenvolvimento do estado sintetiza algumas das características do desenvolvimento nacional, sobretudo pela diversidade regional (Balbino *et al.*, 2019). Além da importância econômica estratégica, a BR-262 destaca-se por ser uma representação da pluralidade social e econômica existente em Minas, que pode ser percebida pela análise das mesorregiões que atravessa. A área que é objeto do presente trabalho caracteriza-se pela continuidade física, mas também é marcada pelas singularidades (Lencioni, 2003).

As cinco mesorregiões do estado, que são cortadas pela rodovia, apresentam relações diferenciadas com ela. No Triângulo Mineiro, os fluxos decorrentes de e intensificados pela rodovia têm um papel histórico na indução do crescimento acelerado e no desenvolvimento da região, principalmente no setor do agronegócio. As mesorregiões Oeste de Minas e Central Mineira detêm realidades sociais, econômicas e culturais muito parecidas, caracterizadas pelo fluxo migratório proporcionado pelas indústrias. Já a Região Metropolitana de Belo Horizonte é marcada pelo maior desenvolvimento econômico do estado e movimentos pendulares intensos, que reforçam a interdependência entre os municípios. Enquanto a Zona da Mata, que apresenta o menor dinamismo econômico entre as mesorregiões analisadas, é aquela que sofre menor influência da rodovia.

A rodovia BR-262 pode ser considerada um marco territorial em Minas Gerais. Uma linha imaginária proposta em relatório da Fundação João Pinheiro (FJP, 2005), divide o estado em duas metades. A primeira metade, representada em rosa na Figura 1, é formada

por municípios que necessitam receber investimentos de políticas públicas para o desenvolvimento local, enquanto a segunda, representada em laranja, detém os municípios de melhor condição econômica, capacidade de responder aos investimentos que recebe e também maior crescimento populacional provocado pela migração. Apesar de a BR-262 não ter traçado coincidente com a linha imaginária da FJP, se for considerado que a rodovia tem uma faixa de influência a partir dela, identifica-se essa divisão. Com isso, mesmo que haja grandes diferenças econômicas, sociais e de fluxo entre as cinco mesorregiões cortadas pela via, é possível identificar um padrão de maior desenvolvimento econômico na sua faixa de influência, um eixo que promove uma reestruturação urbana que atrai investimentos do ponto de vista físico-geográfico e provoca transformações ao longo da via e próximo a ela.

**Figura 1:** Divisão do território mineiro segundo a Fundação João Pinheiro.
*Fonte: elaborado pela autora a partir de dados do IBGE (2020) e da Fundação João Pinheiro (2005).*

Atualmente, a rodovia possui três trechos duplicados no estado de Minas Gerais: o anel viário Celso Mello Azevedo (1967-1980), Nova Serrana – Betim (2009-2011) e Uberaba – Campo Florido

(2014-2015). Por possibilitar uma análise pós construção e pós duplicação, o estudo considerou a relação da via com o tecido urbano nos municípios localizados no extremo dos trechos duplicados. São eles: A conurbação Betim, Contagem e Belo Horizonte, na mesorregião Metropolitana de Belo Horizonte; Nova Serrana, no Oeste de Minas e Uberaba, e Campo Florido, ambos no Triângulo Mineiro, como pode ser observado na Figura 2.

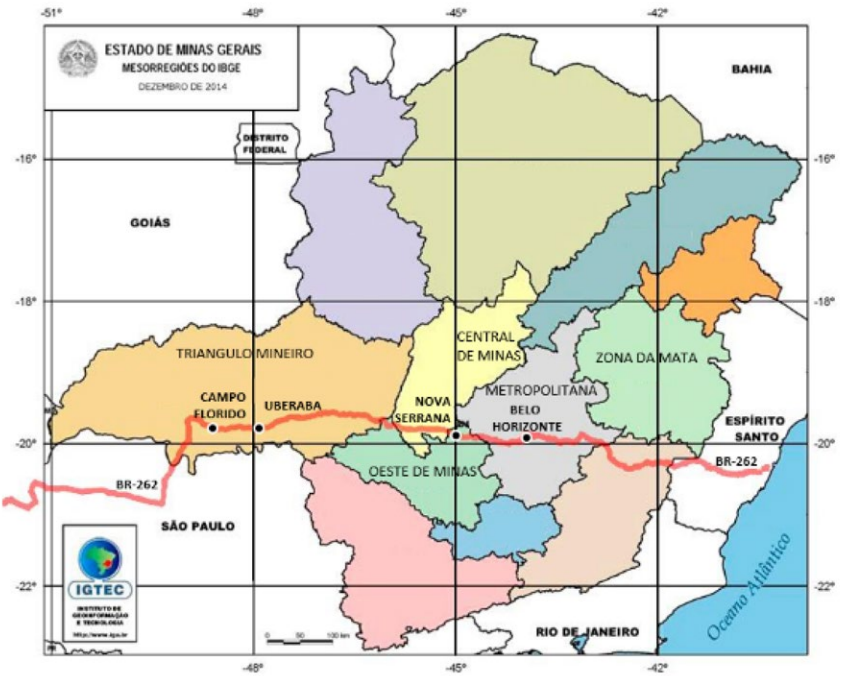



**Figura 2:** Localização dos municípios de Campo Florido, Uberaba, Nova Serrana e Belo Horizonte no estado de Minas Gerais sobre o mapa base das Mesorregiões do IBGE. *Fonte: adaptado pela autora a partir de Governo de Minas Gerais, 2014.*

Essa amostragem, além de composta por diferentes mesorregiões do estado, possibilita uma análise diversificada, por incluir municípios de diferentes portes, importância estadual e densidade demográfica, como pode ser observado na Tabela 1. Essa variedade possibilita observar diferentes relações entre a infraestrutura rodoviária e o desenvolvimento do espaço urbano.

| MUNICÍPIO | POPULAÇÃO (HABITANTES) | POSIÇÃO NO ESTADO | % POPULAÇÃO | DENSIDADE DEMOGRÁFICA |
|---|---|---|---|---|
| **Campo Florido** | 8.269 | 410 | 0,04 | 6,70 hab/km² |
| **Nova Serrana** | 105.520 | 29 | 0,51 | 373 hab/km² |
| **Uberaba** | 337.092 | 7 | 1,64 | 74,68 hab/km² |
| **Betim** | 378.089 | 5 | 1,84 | 1.197,01 hab/km² |
| **Contagem** | 603.442 | 3 | 2,94 | 3.193,20 hab/km² |
| **Belo Horizonte** | 2.575.151 | 1 | 12,54 | 6.988,18 hab/km² |
| **Minas Gerais** | 20.539.989 | | 100 | 35,02 hab/km² |

**Tabela 1:** Dados populacionais e de densidade demográfica dos municípios analisados. *Fonte: Elaborado pela autora a partir de dados do IBGE Cidades.*

## A RODOVIA NO PLANEJAMENTO

A relação da cidade atual com a rodovia dialoga com o entendimento de Zioni (2020) sobre a reestruturação produtiva do século XXI, em que não existe mais a separação entre regional e urbano. A BR-262 exerce papel regional e também municipal, integrada à malha urbana. A sobreposição de diferentes escalas e setores que compõem o espaço é um desafio para o planejamento, uma vez que se tem uma mesma infraestrutura que atende a várias delas.

A falta de integração das políticas públicas pode ser observada nos planos diretores dos municípios conurbados de Belo Horizonte, Contagem e Betim. Existem diversos planos para esse território: Plano de Mobilidade Urbana de Belo Horizontes (2019), Plano Diretor de Desenvolvimento Integrado da Região Metropolitana de Belo Horizonte - PDDI-RMBH (2009-2011), Plano Diretor de Betim (2018), Plano Diretor de Contagem (2018) e Plano Diretor de Belo Horizonte (2020). Como semelhança, eles propõem a existência de corredores ao longo do eixo da rodovia, um modelo conservador de zoneamento industrial ao lado de infraestruturas de transporte.

Contudo, os planos que incidem no território evidenciam o entrave entre as diferentes escalas de planejamento e entre municípios vizinhos. Cada plano possui seu próprio zoneamento e, como pode ser observado no Macrozoneamento do Plano Diretor de Contagem, na Figura 3, o plano representa uma interrupção, como se o limite administrativo representasse de fato uma descontinuidade do território. No entanto, essa interpretação não corresponde à realidade de municípios conurbados, nos quais, ao se trafegar, não se distingue quando se está em um município ou em outro, por não existir nenhuma alteração significativa no tecido urbano.

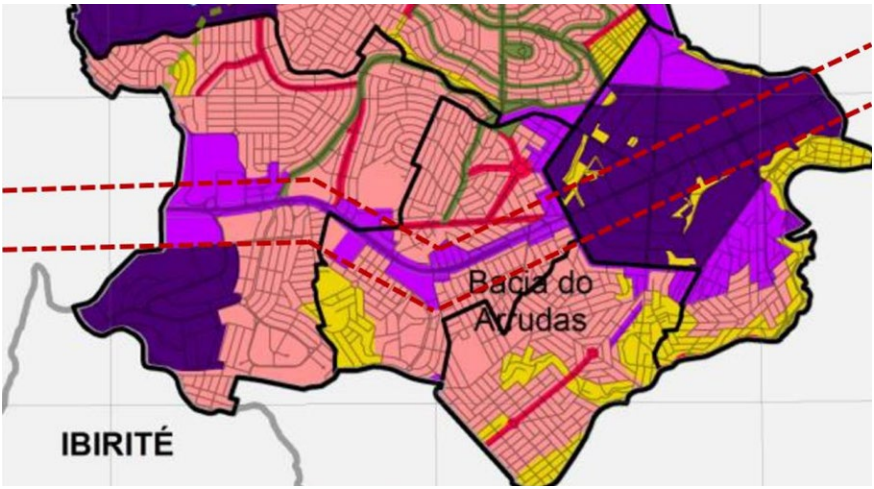



**Figura 3:** Trecho do macrozoneamento de Contagem. *Fonte: adaptado pela autora a partir do Mapa do Macrozoneamento do Plano Diretor de Contagem, 71 2018.*

No Plano Diretor vigente de Uberaba (2006), a BR-050 e a BR-262 aparecem como os principais componentes do sistema de mobilidade do município, ou seja, incorporadas ao planejamento urbano. No Plano, as rodovias aparecem como eixo de expansão e de crescimento, e existem faixas de 500m a 1.000m para cada lado destinadas à instalação de empresas, com o objetivo de "estimular o desenvolvimento econômico do Município e a divulgação de uma imagem positiva de Uberaba com o aproveitamento da locali-

zação privilegiada em função da facilidade de acesso às rodovias." (Prefeitura de Uberaba, 2018, p.114).

A estratégia de criação de um corredor de ocupação específica ao longo da rodovia utilizada nos Planos Diretores de Uberaba, Betim e Contagem também foi utilizada em Campo Florido, onde é prevista a criação das áreas de eixos de desenvolvimento econômico, que são faixas de até 1.000 metros a partir das rodovias, destinadas à criação de loteamentos empresariais destinados a empresas de grande e médio porte, o que demonstra que o município segue a lógica de grandes cidades. No entanto, o plano não considera as características e os usos peculiares da rodovia existentes em Campo Florido. Se fossem implantados os mil metros, praticamente toda a cidade seria destinada para esse uso, como pode ser observado na Figura 4. Tal fato vai contra o uso consolidado e o proposto no uso e ocupação do solo pela própria lei.

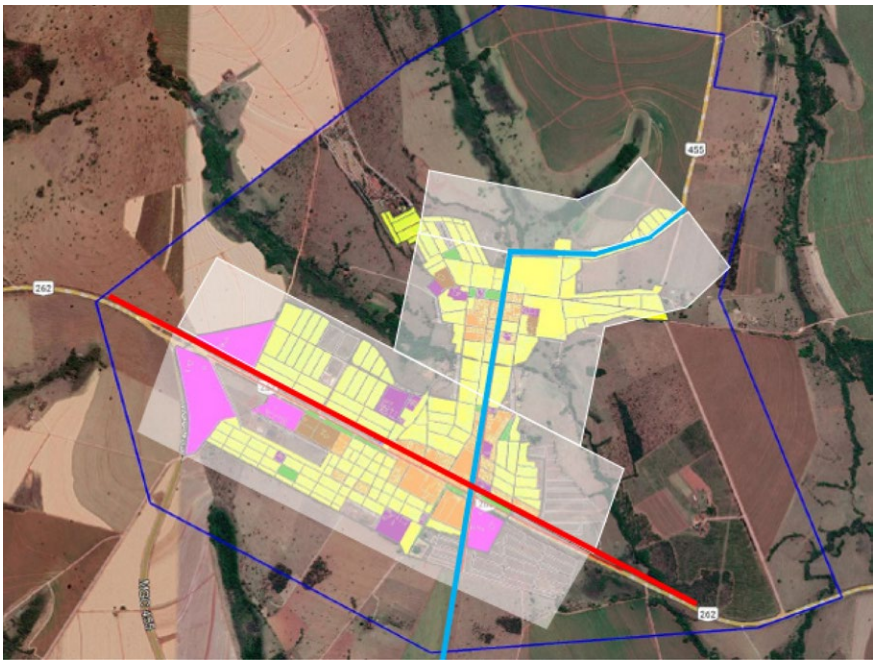



**Figura 4:** Marcação do eixo de mil metros a partir da rodovia federal (BR-262, em vermelho) e da estadual (MG-455, em ciano) previsto no Plano Diretor Municipal – marcação realizada sobre o mapa de Uso de Ocupação do Solo do próprio Plano.
*Fonte: adaptado pela autora a partir de Plano Diretor de Campo Florido, 2022.*

Em Nova Serrana, temos o caso mais emblemático de ausência de diálogo entre a infraestrutura e a cidade no planejamento urbano. A BR-262 está marcada no mapa do Plano Diretor, mas não é levada em consideração na hora de fazer o zoneamento e de estabelecer diretrizes, não sendo sequer mencionada no texto do Plano Diretor. Esses casos demonstram que, com o modelo de planejamento atual, perde-se a oportunidade de pensar a cidade de forma multiescalar a partir das rodovias que estruturam as cidades, o que produz interseções problemáticas entre rodovia e cidade.

## IMPACTO DA RODOVIA NO TECIDO URBANO

A intensificação dos fluxos das linhas de transporte inter-regionais, provocada pelo aumento das trocas, aliado ao esgarçamento do tecido urbano, fazem com que se aumente os conflitos de escala entre rodovias e cidades. Isso acontece porque existem fluxos e ocupações regionais e urbanos em um mesmo espaço, e a rodovia tem papel não somente de via, mas de um obstáculo para transposição, em decorrência da complexidade de seu tráfego.

Em Nova Serrana, a rodovia é uma grande interrupção no tecido urbano, pois faz a divisão entre os "dois lados" da cidade. Segundo o ex-Deputado Estadual Fábio Avelar, "Nova Serrana é cortada pela 262, praticamente, hoje, a 262 tá (sic) no centro de Nova Serrana, ela corta a cidade no meio, de um lado tem 70 mil habitantes, e de outro lado tem 50 mil habitantes". Tal afirmação deixa claro a segregação urbana e social que a rodovia provoca. A barreira que a rodovia representa para o tecido urbano também é uma barreira social, uma vez que a população que ocupou o "outro lado" da rodovia foi justamente a que foi expulsa da cidade consolidada para um lugar marginalizado. O acesso entre os dois lados da cidade era feito por um único trevo, que pode ser visto na Figura 5. O trevo era marcado por trânsito intenso e conflituoso, e nele ocorriam muitos acidentes. Por causa dessa característica, foi criada a lenda urbana de que o trecho seria mal-assombrado.

**Figura 5:** Antigo trevo de Nova Serrana. *Fonte: adaptado do perfil do Instagram @novaserrana_mg, 2020.*

Para resolver o problema de segurança no cruzamento, foram construídas duas trincheiras — uma em 2005 e outra em 2014. Houve minimização significativa da quantidade de acidentes, mas, no entanto, as trincheiras configuraram-se como uma solução setorial que intensificou a segmentação do tecido urbano, o efeito barreira provocado e a distância social entre as partes integradas fisicamente, como pode ser observado na Figura 6.

**Figura 6:** Primeira trincheira de Nova Serrana.
*Fonte: Instagram @novaserrana_mg, 2020.*

Ao longo dos quase 40 km da BR-262 que atravessam os municípios conurbados de Betim, Contagem e Belo Horizonte, com o nome de anel viário Celso Melo de Azevedo, seu entorno é extremamente ocupado e diverso. O uso industrial compartilha espaço com muitos outros, como o comercial, atrelado à rodovia, além do residencial formal e informal, com moradias às margens da via, como pode ser observado na Figura 7. Apesar da sua importância como infraestrutura regional e nacional de transporte de cargas e pessoas, o anel viário constitui um obstáculo e forma barreira ao tecido urbano, por causa de suas pistas, canteiros, muretas, viadutos e poucas passarelas, à medida em que interrompe a malha local de circulação física e de relações sociais. Esse fato contribui para a degradação do espaço urbano. Com isso, tem-se um espaço hostil para a ocupação humana, o que gera diversos problemas, como poluição do ar, da água, sonora e visual, além de dificuldade de acesso seguro a equipamentos públicos. Esse trecho é um dos 100 com mais óbitos por acidentes no Brasil (CNT, 2017).

**Figura 7:** Ocupações irregulares às margens do Anel Rodoviário Celso Melo de Azevedo. *Fonte: Tôrres (2013).*

Em Uberaba, a situação é semelhante. Apesar do crescimento para além da rodovia, ela ainda se coloca como uma barreira urbana, visto que existe uma divisão física criada por canteiros e

alguns pontos de acesso. O uso no entorno relaciona-se ao papel da rodovia, como postos, restaurantes, hotéis, transportadoras e supermercados. O lado externo é ocupado, predominantemente, por habitações de padrões diversos, desde loteamentos populares até condomínios de luxo.

**Figura 8:** BR-262 em Uberaba. *Fonte: G1 MG (2020).*

Em Uberaba, Nova Serrana e na conurbação Betim – Contagem – Belo Horizonte, a função da rodovia que se sobressai ao observar o tecido urbano é a da rodovia. É como se a cidade tivesse que se adaptar à função da rodovia, que prevalece e segrega o tecido urbano. Além disso, essa configuração urbana favorece o transporte por veículos motorizados, o que faz com que seja um ambiente inóspito ao pedestre.

Uma característica peculiar da relação de Campo Florido com a rodovia é que ela é percebida na paisagem como uma via local de comércio cotidiano, não como rodovia. É a principal concentração de comércio da cidade, e nela não são encontradas somente atividades relacionadas ao transporte, como postos de combustíveis e centros automotivos, mas de contextos diversificados, como supermercado, padaria, açougue, farmácia, igreja, consultório

odontológico, dentre outros. Isso faz com que ela se caracterize como estrada-mercado, conceito criado por Domingues (2009) para a urbanização linear que se dá ao logo da via, na qual os fluxos e os usos se misturam.

**Figura 9:** BR-262 em Campo Florido. *Fonte: Google Street View (2025).*

Em todas as cidades analisadas, a rodovia recebe diferentes escalas de fluxo, desempenhando o papel de rodovia, com o trânsito regional, além do trânsito do cotidiano das pessoas. A BR-262 tornou-se um claro exemplo do que Domingues (2009) denomina como estrada-rua, na qual se mistura o trânsito de passagem da estrada com o de movimentos cotidianos, como na rua, o que gera um conflito permanente. Esse funcionamento faz com que se tenha um claro exemplo do conflito que Domingues (2009) aponta para as ruas da estrada, que são rápidas demais para quem lá vive e congestionadas demais para quem lá passa.

O conflito de escalas produz interseções rodovia-cidade problemáticas e consolida as rodovias como uma barreira, um obstáculo no tecido urbano. A rodovia em um espaço urbano potencializa os impactos, uma vez que coloca a população em contato com todos os riscos associados à rodovia (Brasileiro *et al.*, 2014), o que gera segregação social, violência e aumento da poluição e da quantidade de acidentes.

## A INFLUÊNCIA DAS RODOVIAS NA DISPERSÃO URBANA

A dispersão urbana é definida por Reis Filho (2006) como o fenômeno do espalhamento crescente da urbanização em todo o território, caracterizada pelo esgarçamento do tecido dos núcleos para além dos limites da cidade consolidada. Caminha na direção de sua periferia, com a diminuição da densidade de algumas áreas já estabilizadas e a expansão das áreas urbanizadas e dos espaços metropolitanos para escalas territoriais cada vez mais ampliadas e com grande interdependência e mobilidade (Reis Filho, 2006).

Em Nova Serrana, investimentos públicos em infraestrutura, como a ligação com a rede da Cemig, em 1967, e a abertura do tráfego da BR-262, em 1969, impulsionaram o aumento da quantidade de fábricas e o crescimento populacional. O município tem sido, por décadas, o que mais cresce em Minas Gerais, em decorrência da grande atratividade exercida para os movimentos migratórios (IBGE, 2010). O incremento populacional fez com que o tecido urbano se expandisse e, com isso, sua relação com a BR-262 foi modificada. A Figura 10 retrata os anos 1980, representando a rodovia, marcada de vermelho, em um planalto, distante da área urbana da época.

**Figura 10:** Município de Nova Serrana (1980). A BR-262 é a faixa em vermelho ao fundo. *Fonte: adaptado de Instagram @novaserrana_mg, 2021.*

Essa expansão é retratada na Figura 11, na qual se encontram destacadas as manchas urbanas de 1985 (ciano) e de 2020 (vermelho). A área urbana, em 1985, encontrava-se apenas ao sul da BR-262. Ao longo dos anos, o incremento populacional fez com que a cidade expandisse e ultrapassasse a barreira representada pela rodovia. Com isso, fica evidenciada a mudança na posição da cidade, que se expandiu no sentido da via.

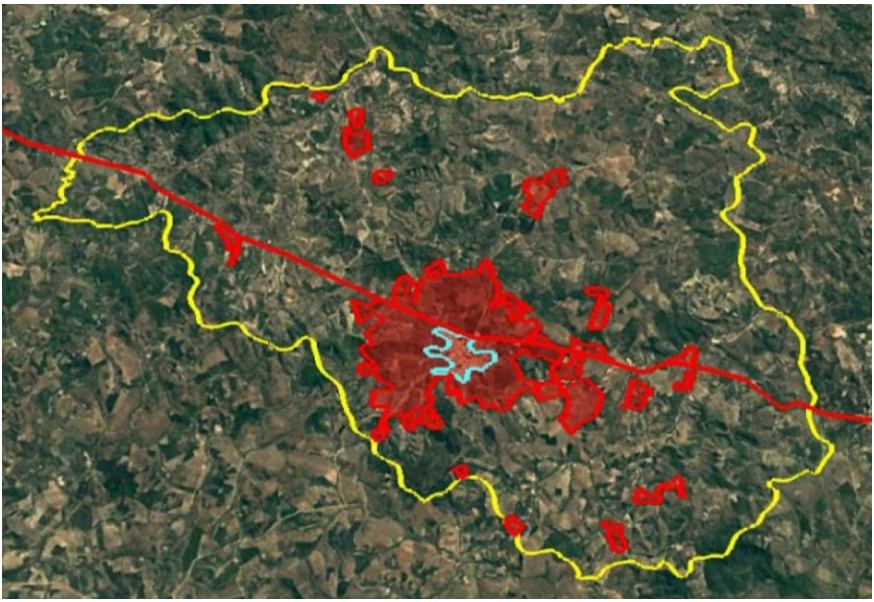


**Figura 11:** Imagem de satélite município de Nova Serrana – manchas urbanizadas entre 1985[1] (em ciano) e 2020 (em vermelho). *Fonte: adaptado pela autora a partir de imagem do Google Earth, 1985.*

Foi feita, também, uma comparação entre imagens de satélite de 2008 e de 2020 — um período de 12 anos —, para entender como o crescimento ocorreu na escala urbana após a duplicação do trecho da rodovia que liga a cidade a Betim. Marcados em vermelho na Figura 12 encontram-se todos os loteamentos que surgiram nesse intervalo, alguns, consolidados com muitas construções; outros, apenas com o traçado viário. A imagem deixa clara

1 Imagem mais antiga disponível no Google Earth.

a expansão urbana pelo território, contudo, não é possível identificar um padrão para o aumento do tecido, já que ele se dá em todas as direções e não respeita o perímetro urbano estabelecido no Plano Diretor de 2007 (polígono amarelo na Figura 12).

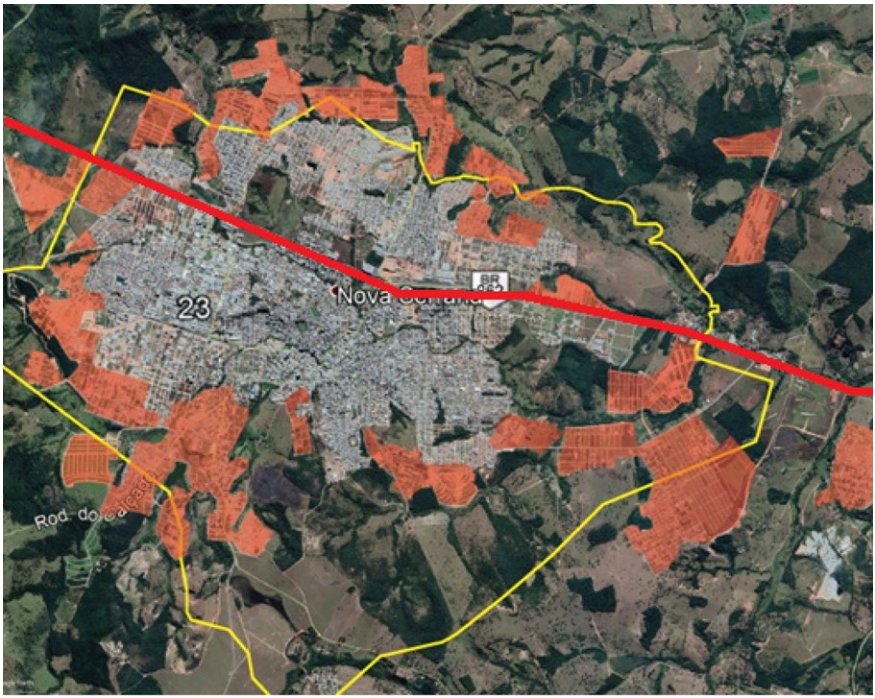



**Figura 12:** Novos loteamentos criadosentre 2008 e 2020. *Fonte: adaptado pela autora a partir de imagem do Google Earth, 2023.*

A evolução urbana da conurbação Betim – Contagem – Belo Horizonte pode ser observada na Figura 13. Os três municípios estão delimitados em amarelo, a BR-262 está marcada em vermelho e, também em vermelho, pode ser observado o aumento de ocupação entre 1985 e 2020. Nas três cidades, a expansão territorial ocorreu praticamente de forma contínua à ocupação existente, sem a criação de vazios. O fato representa a dispersão, caracterizada, segundo Reis Filho (2006), pelo esgarçamento crescente do tecido dos núcleos para além dos limites da cidade consoli-

dada, no sentido de suas áreas periféricas. Todavia, em Betim se vê, também, a existência de núcleos ampliados e de vazios, com o surgimento de bairros isolados no contexto da cidade consolidada (Reis Filho, 2006).

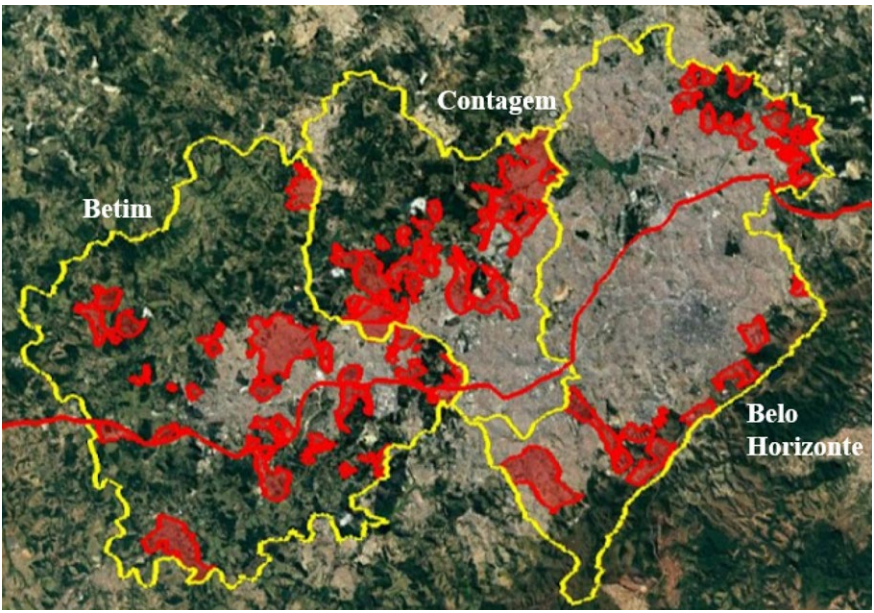



**Figura 13:** Conurbação dos municípios de Belo Horizonte, Betim e Contagem – comparativo ocupação 1985 a 2020 e delimitação dos perímetros urbanos. *Fonte: adaptado pela autora a partir de imagem do Google Earth, 1985; 2020.*

Para analisar o papel da BR-262 na configuração urbana de Uberaba, utilizou-se o mapa de fundação dos loteamentos urbanos, produzido por Minaré (2022), que mostra a evolução por década, entre 1930 e 2020, e pode ser observado na Figura 14. Até a década de 1960, quando foi feita a pavimentação da BR-262, esta tinha o papel de uma espécie de arco ao sul. Com o passar do tempo, a cidade expandiu em todas as direções e incorporou a rodovia como uma via urbana.

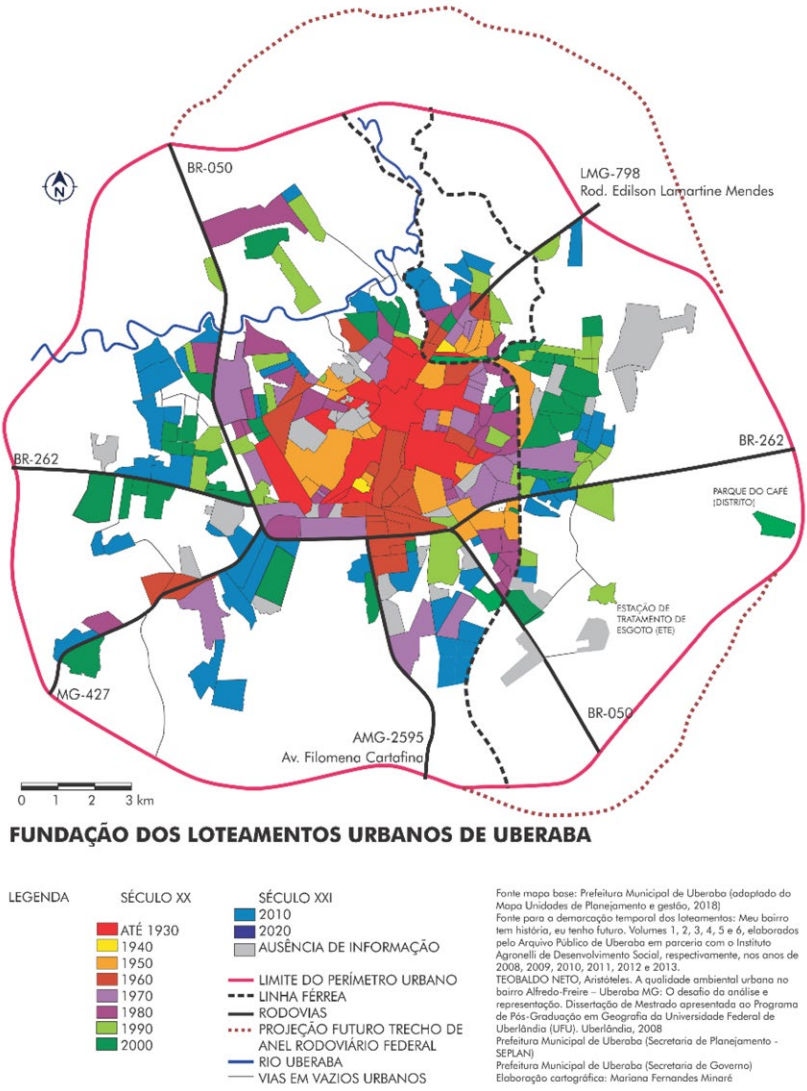



**Figura 14:** Fundação dos loteamentos urbanos de Uberaba. *Fonte: Minaré, 2022.*

Ao analisar a evolução urbana de Campo Florido ao longo do tempo, revela-se uma situação interessante. A ocupação existente em 1985 (marcada em ciano na Figura 15) mostra o núcleo histórico da cidade, à nordeste, e uma extensão no sentido da BR-262, que a ultrapassa. A expansão urbana que ocorreu nesses 35 anos (marcada em vermelho na figura 15) foi feita ao longo do eixo da rodo-

via, em seus dois lados, o que evidencia o poder de atração para a expansão urbana que a rodovia exerceu.

**Figura 15:** Comparação da evolução da malha urbana de Uberaba entre os anos de 1985 e 2020. *Fonte: adaptado pela autora a partir de imagem do Google Earth, 1985; 2020.*

Em todos os casos analisados, foi constatado que a rodovia atrai usos diversos para o seu eixo, que são locais de ocupação mais intensa e com maior densidade. No entanto, a dispersão urbana ocorre também em outras direções, e a sua influência sujeita-se a outros fatores. Dessa forma, não é possível estabelecer uma relação direta da rodovia com a dispersão urbana. Ao mesmo tempo, o tecido urbano disperso aumenta as distâncias entre os núcleos urbanos e, com isso, aumenta também a dependência do transporte rodoviário, o que aumenta a poluição emitida por veículos automotores. Além disso, a existência de vazios urbanos faz com que a cidade seja menos segura para caminhar. Outro fator relevante é que a dispersão urbana amplia a área ocupada pela cidade, o que pode ocorrer em locais que anteriormente eram áreas de interesse ambiental, diminuindo reservas florestais e matas mananciais.

## A INFLUÊNCIA DA RODOVIA NA METROPOLIZAÇÃO

No processo de regionalização do cotidiano, as trocas diárias deixam de ser apenas locais e passam a ser regionais. Isso difunde os modos metropolitanos de vida e consumo, e aumenta a dependência da infraestrutura viária, principalmente rodoviária, criando um padrão de metropolização (Reis Filho, 2006).

O trecho da BR-262 coincidente com a BR-381 e com o anel viário de Belo Horizonte, denominado Celso Mello Azevedo, possui importância estratégica para a produção industrial do estado. Nele, localizam-se o Polo Industrial Juventino Dias, a refinaria Gabriel Passos e a fábrica da Fiat. Por isso, foi o primeiro trecho da BR-262 a ser duplicado, entre 1967 e 1980. Na conurbação urbana formada por Betim, Contagem e Belo Horizonte, a BR-262 atua não apenas na escala regional, mas também na urbano-regional, o que contribui para a metropolização do cotidiano desses municípios.

Um estudo realizado pelo Observatório das Metrópoles identificou que, entre 2000 e 2010, houve aumento dos níveis de integração na Região Metropolitana de Belo Horizonte - RMBH. O fato demonstra o crescente aumento da dinâmica metropolitana entre todos os 34 municípios integrantes da RMBH.

A duplicação do trecho que liga Nova Serrana a Betim reforça a afirmação de Pottier (1963) de que as vias que recebem facilidades são as de maior importância estratégica. A obra de duplicação do trecho Nova Serrana - Betim, entre 2009-2011, possibilitou que o percurso em direção à região metropolitana fosse feito de forma até 20% mais rápida e intensificou a relação com Belo Horizonte. A melhoria do fluxo, que se dá pela expansão das fábricas para os municípios vizinhos e pelo movimento pendular de trabalhadores, permitiu o desenvolvimento das atividades do polo calçadista, que impacta toda a microrregião.

Os movimentos pendulares e a regionalização do cotidiano com os municípios do entorno presentes na dinâmica urbana de Nova Serrana são um exemplo de cidade no qual “o espaço metropolizado não é exclusivo da metrópole e nem se confina às fronteiras de uma região metropolitana” (Lencioni, 2013, p.17).

A duplicação do trecho que liga Uberaba a Campo Florido, em 2014, potencializou a "regionalização do cotidiano", que sempre existiu entre as duas cidades. Um entrevistado que possui vínculo nas duas cidades relatou que "minha vida toda foi na estrada", por causa da forma como ela sempre esteve incorporada ao seu cotidiano.

A relação entre as duas cidades, assim como em Nova Serrana, é mais um exemplo em que a dinâmica metropolitana não é mais exclusividade da metrópole ou da região metropolitana institucionalizada, como colocado por Lencioni (2003). Após a duplicação, o trajeto ficou ainda mais ágil. Relato de moradores informam que o trecho, que antes era feito em 50 minutos, passou a ser realizado em 40 minutos.

O movimento pendular de pessoas que saem de Campo Florido para estudar e trabalhar em Uberaba é grande, e existe um sistema de ônibus fretados para atender essa demanda. Há, também, deslocamentos esporádicos de pessoas que buscam atendimentos médicos de maior complexidade, uma vez que a cidade não possui hospital, e também deslocamento para compras cotidianas.

Essa estrutura reforça a influência de Uberaba sobre Campo Florido. No entanto, de acordo com comerciantes, após a duplicação as vendas do comércio diminuíram, pois a facilidade do acesso leva as pessoas a preferirem fazer compras em Uberaba. Uma demonstração de que nem sempre a melhoria da infraestrutura leva ao desenvolvimento local, e que pode gerar uma relação de dependência que não é vantajosa.

Outra peculiaridade desse trecho é que a sua duplicação não ocorreu por ser o trecho de maior interesse econômico, como coloca Pottier (1963). O contrato de concessão foi feito com a empresa Triunfo-Concebra para obras de duplicação no estado de Minas Gerais, em um total de 724 km. Era estabelecido que a empresa deveria executar 10% da obra para poder passar a explorar economicamente a rodovia e cobrar pedágio. A empresa optou por iniciar o trabalho no trecho de 73km com menor movimento e cuja execução era mais simples, por não ter obras de arte, como pontes e viadutos, e ser, consequentemente, mais barato. Após sua execução, iniciou-se a cobrança de pedágios em toda a extensão,

nos pontos previstos no contrato, mas, desde a finalização desse trecho, não foram executadas mais obras nem investimentos significativos na rodovia, o que resultou nesse sendo o único trecho duplicado por esse contrato.

O aumento dos fluxos da rodovia, que é realizado por veículos automotores, provoca o aumento da poluição e da emissão de gases do efeito estufa, o que contribui para o cenário global de mudanças climáticas.

## CONCLUSÃO

Este trabalho buscou refletir sobre o impacto das rodovias nas cidades. Seu objeto de estudo foi o eixo da BR-262 situado em Minas Gerais, cuja relação demonstrada é reproduzida em outras cidades brasileiras que também são abordadas por rodovias. Atualmente, os fluxos das rodovias são cada vez mais intensos, e superam os fluxos exclusivamente regionais de mercadorias, o que os incorpora as funções relativas à dinâmica urbana, com deslocamentos cotidianos de pessoas em escala regional e da cidade.

No decorrer deste estudo, foi demonstrada a importância estratégica da BR-262 em Minas Gerais, em especial seu papel como um eixo de desenvolvimento. Essas constatações fazem da BR-262 um indutor estratégico de riquezas e influências de grande importância para o desenvolvimento regional. Trata-se de uma demonstração de que a BR-262 exerce um papel significativo na concentração de riqueza, além de ser estratégica para o recebimento de investimentos.

Nas relações existentes entre os municípios de Betim, Contagem e Belo Horizonte, entre Nova Serrana e Belo Horizonte e entre Uberaba e Campo Florido, a BR-262 desempenha o papel de infraestrutura crítica, pois possibilita a qualidade de vida e o bem estar social, devido à prestação de serviços essenciais numa vasta gama de setores, como saúde, cuidado social, educação, transporte, energia, telecomunicações, segurança pública e serviços de emergência. (World Bank, 2021). Nos casos analisados, a intensificação dos fluxos e a metropolização foram aumentados com a melhoria da qualidade da infraestrutura.

No entanto, o incremento dos fluxos traz impactos distintos — não necessariamente positivos — aos municípios. A intensificação dos fluxos e da dependência entre os municípios contribui também para o aumento da poluição e da emissão de gases do efeito estufa, uma vez que o tráfego que é intensificado é feito por veículos automotores, muitas vezes de uso individual.

Verificou-se, também, que a rodovia é uma possível indutora da dispersão urbana, uma vez que ela intensifica os usos em seu eixo. No entanto, não se podeestabelecer uma relação direta da rodovia com a dispersão urbana, uma vez que sua influência está sujeita a outros fatores. A dispersão urbana provoca a ocupação de áreas cada vez mais distantes do núcleo urbano consolidado, o que aumenta o custo de manutenção da cidade, uma vez que se torna necessário levar infraestrutura para locais cada vez mais distantes.

A dispersão urbana provoca também impactos ambientais. Em muitos casos, a expansão ocorre sobre áreas de preservação ambiental, cuja supressão gera impactos, como redução da biodiversidade, impacto no ciclo hidrológico e no controle térmico, aumento da emissão de gases do efeito estufa e aumento da impermeabilidade do solo. Outra consequência negativa da dispersão urbana no meio ambiente é que o aumento das distâncias entre os núcleos urbanos aumenta a dependência do transporte rodoviário, que produz poluição emitida por veículos automotores.

O trabalho evidencia a necessidade de elaboração de políticas públicas que combatam a dispersão urbana através de diretrizes para o uso do solo no eixo da rodovia e a fiscalização do cumprimento do Plano Diretor e de ocupações irregulares, além de ações que possibilitem a adaptação ou minimização dos impactos ambientais negativos sobre a infraestrutura — ou seja, que promovam a resiliência —, como planos de gerenciamento de risco e de recuperação após a ocorrência de situações adversas e o mapeamento das áreas de maior risco.

Outra importante constatação na busca da compreensão do impacto da rodovia na cidade sobre o aspecto das políticas públicas foi a da inexistência de legislações que integrem as múltiplas escalas que a rodovia abrange e sua influência nas dinâmicas nacionais, estaduais, metropolitanas, regionais e municipais. Nos pro-

jetos rodoviários de âmbito nacional, não se encontra referência ao tecido urbano. Por outro lado, em nenhum dos planos diretores municipais analisados aparecem diretrizes ou propostas para a interseção da rodovia, uma infraestrutura de escala nacional, com a escala urbana.

A ausência de um desenho urbano pensado de forma a integrar diferentes escalas resulta em soluções setoriais, o que cria um conflito escalar, além de barreiras e cicatrizes no tecido urbano. As interseções rodovia-cidade problemáticas, com alto índice de acidentes e poluição, violência, ocupações irregulares e estradas que são, conforme descreve Domingues (2009), rápidas demais para quem lá vive e congestionada demais para quem lá passa, são a representação desse conflito escalar. É necessário, portanto, que o planejamento ocorra de forma articulada, a fim de integrar às suas diferentes escalas as rodovias e as interseções urbanas, além das mudanças climáticas, de forma a reduzir os impactos ambientais e promover a resiliência do setor de transporte no Brasil.

## REFERÊNCIAS


AVELAR, F. **Discurso do Deputado Estadual em audiência pública realizada para discussão da nova concessão da BR-262**. Audiência realizada em 01 de dezembro de 2022.

BALBINO *et al*. A Economia brasileira no estado de Minas Gerais: Uma análise das desigualdades socioeconômicas do espaço mineiro à luz de sua formação econômica. In: **Anais 8º Enanpur**, Natal, 2019.

BRASILEIRO, L. A.; SCHIAPATI, R. S.; COMAR, L. C. **A Influência de Rodovias na Área Urbana**. In: Revista Nacional de Gerenciamento de Cidades , [S. l.], v. 2, n. 13, 2014. DOI: 10.17271/23188472132014763. Disponível em: <https://publicacoes.amigosdanatureza.org.br/index.php/gerenciamento_de_cidades/article/view/763>. Acesso em: 14 abr. 2022.

COSTA, M. de L. P. M. A Urbanização e Suas Novas Conotações – rebatimentos sobre o processo de reestruturação do ter-

ritório. In: REIS, N. G.; BENTES, J. C. da G. (organizadores) **Dez anos de diálogos sobre dispersão urbana**. São Paulo: FAUUSP, 2017, p. 177-197.

DOMINGUES, Álvaro. **A rua da estrada.** Porto: Dafne Editora, Livros de Arquitetura, 2009.

FUNDAÇÃO JOÃO PINHEIRO. **A economia de Minas Gerais em 2019**. ISBN: 2595-6132, Belo Horizonte: FJP, 2020. Disponível em: <http://fjp.mg.gov.br/wp-content/uploads/2020/05/A--Economia-de-Minas-Gerais-em-2019_.pdf>. Acesso em: 9 out. 2020.

FUNDAÇÃO JOÃO PINHEIRO. **Índice Mineiro de Responsabilidade Social**. 2016. Disponível em: <http://imrs.fjp.mg.gov.br/Perfil>. [dados com datas variáveis] Acesso em: 25 ago. 2020.

GOVERNO DE MINAS GERAIS. **Localização geográfica**. Disponível em: <https://www.mg.gov.br/conteudo/conheca-minas/geografia/localizacao-geografica>. Acesso em: 23 mai. 2021.

G1 MG. **Projeto de melhorias para trecho urbano da BR-050 em Uberaba é apresentado por concessionária. 2020. Disponível em**: https://g1.globo.com/mg/triangulo-mineiro/noticia/2020/07/07/projetos-de-melhorias-para-trecho-urbano-da-br-050-em-uberaba-e-apresentado-por-concessionaria.ghtml. Acesso em: 19 out. 2025.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (Brasil). **Arranjos populacionais e concentrações urbanas no Brasil (2016)**. Disponível em: <www.ibge.gov.br/apps/arranjos_populacionais/2015>. Acesso em: 9 out. 2020.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (Brasil). **Censo (2010)**. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/estatisticas/sociais/rendimento-despesa-e-consumo/9662-censo-demografico-2010.html?=&t=sobre>. Acesso em: 21 set. 2021.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (Brasil). **Censo (2022)**. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/estatisticas/sociais/populacao/22827-censo-demografico-2022.html?=&t=resultados> . Acesso em: 21 set. 2021.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (Brasil). **IBGE Cidades**. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/>. Acesso em: Acesso em: 9 out. 2020.

LENCIONI, S. Metropolização do espaço: processos e dinâmicas. In: FERRERIA, A.; RUA, J.; MARAFON, G. J.; SILVA, A. C. P. (organizadores). **Metropolização do espaço. Gestão territorial e relações urbano-rurais**. Rio de Janeiro: Consequência, 2013, pp 17- 34.

LENCIONI, S. **Região e Geografia**. 2ª ed. São Paulo: Edusp, 2003.

LIMA, M. G. (2023). **Rodovia e cidade: a Rodovia BR-262 em Minas Gerais e seus aspectos urbano-regionais**. Dissertação de mestrado. São Carlos-SP, Universidade de São Paulo.

MINARÉ, M. F. (2023). **Infraestrutura e planejamento no processo de urbanização de Uberaba-MG**. Dissertação de mestrado. São Carlos-SP, Universidade de São Paulo.

POTTIER, P. **Axes de communication et développement économique**. In: Revue économique, volume 14, n°1, 1963. pp. 58-132. Disponível em: <https://www.persee.fr/doc/reco_0035-2764_1963_num_14_1_407543>. Acesso em: 13 jan. 2022.

PREFEITURA DE BELO HORIZONTE. **Plano Diretor de Belo Horizonte** [Ocupação do Solo]. Belo Horizonte, 2020. Disponível em: <https://prefeitura.pbh.gov.br/sites/default/files/estrutura-de-governo/politica-urbana/2020/e-book_ocupacao_modulo01.pdf>. Acesso em: 25 out. 2022.

PREFEITURA DE BETIM. **Plano Diretor de Betim**. Betim, 2017. Disponível em: <http://www.dpurb.betim.mg.gov.br/site/index.php/legislacao-2/plano-diretor/>. Acesso em: 25 out. 2022.

PREFEITURA DE CAMPO FLORIDO. **Plano Diretor de Campo Florido**. Campo Florido, 2022. Disponível em: <https://campoflorido.mg.gov.br/plano-diretor/>. Acesso em: 14 jun. 2022.

PREFEITURA DE CONTAGEM. **Plano Diretor de Contagem** [Anexos: Zoneamentos e Diretrizes]. Contagem, 2018. Disponível em: <https://www.contagem.mg.gov.br/arquivos/legisla-

cao/lec002482017_anexos-20180112090505.pdf>. Acesso em: 25 out. 2022.

PREFEITURA DE NOVA SERRANA. **Plano Diretor do município de Nova Serrana**. Nova Serrana, 2007. Disponível em: <https://www.novaserrana.mg.gov.br/publicos/05_arquivos_1220171722370.pdf>. Acesso em: 15 nov. 2020.

PREFEITURA DE UBERABA. **Plano Diretor de Uberaba**. Uberaba, 2018. Disponível em: <http://www.uberaba.mg.gov.br/portal/acervo/plano_diretor/arquivos/plano_diretor_e_legislacao_urbanistica/lei_plano_diretor/lc_359/lc_359.pdf>. Acesso em: 4 mai. 2022.

REIS FILHO, N. G. **Notas sobre urbanização dispersa e novas formas de tecido urbano**. São Paulo, Via das Artes, 2006.

TÔRRES, C. **A sociedade do Anel II**. BH-Uma foto por dia, 2013. Disponível em: http://www.bhumafotopordia.com/2013/10/a-sociedade-do-anel-ii-uma-das-mais.html. Acesso em: 19 out. 2025.

WORLD BANK. **Making critical infrastructure resilient: an agenda for the G20**. Washington, DC: The World Bank, 2021.

ZIONI, S. **Dimensões da circulação viária e rodoviária, aspectos da mobilidade urbana e sua relação com a estruturação do território**. Aula ministrada no âmbito da disciplina: IAU 5856 "Tópicos Especiais: Infraestrutura urbana e meio ambiente – parâmetros técnicos e urbanísticos", em 24 de agosto de 2020.

9

# *THE RELATIONSHIP BETWEEN ROADWAY AND CITY: CONFLICTS AND IMPACTS IN URBANIZED AREAS. THE CASE OF THE BR-262 ROADWAY IN MINAS GERAIS*

MARÍLIA GASPAR DE SOUZA LIMA

## *SUMMARY*

This text aims to analyze the influence of the roadwayand infrastructure projects on the structuring of the urban fabric and the development of public planning policies at different scales, through a study of the municipalities located along the BR-262 axis in Minas Gerais. The roadway, which is of national importance, influences metropolization, and urban sprawl, and faces conflicts of scale at its intersections with the urban fabric. Municipal planning schemes often fail to integrate actions with roadway infrastructure, resulting in sectoral solutions, which generates conflict in the relationship between the city and the roadway. The duplication of stretches of the BR-262 improves traffic flow but increases dependence and creates physical barriers to the urban fabric, in addition to increasing air pollution and the number of accidents. The study highlights the need for integrated public policies that consider multiple scales of influence of roadways and promote sustainable development that is resilient to climate change and features more coordinated urban planning.

**Keywords**

Roadways; infrastructure; planning scales; urban fabric

DOI: 10.66949/n2v6z3t9

## INTRODUCTION

Currently, with economic and cultural transformations, as well as advances in technologies and communications, new urban phenomena have emerged (Costa, 2017). Among these is the process of regionalization of daily life, in which daily interactions are no longer merely local but have become regional. This reality brings about a new pattern of territorial organization, which occurs with the intensification of urban sprawl, metropolization, and conflicts of scale. These phenomena increase the dependence on an extensive road infrastructure system for mobility and create new relationships between roadways and cities. In Brazil, where the primary mode of transport is road-based, interregional transport routes have become major expressways, and the use along roadways has intensified (Reis Filho, 2006).

The objective of this study is to understand the influence of the roadway and infrastructure projects on the shaping of the urban fabric and the development of public planning policies at different scales in the municipalities located along its route. To this end, a diverse methodological approach was employed, which enabled the analyses presented here. The study area was characterized using urban, social, economic, and environmental indicators, as well as the study of the regional influences of the Region of Influence of Cities (Região de Influência de Cidades – REGIC). Once the municipalities where the study would be conducted in depth were defined, historical comparative analyses of satellite images of the evolution of the urban fabric were performed, along with analyses of master plans, metropolitan plans, and other relevant legislation affecting the territory, as well as semi-structured interviews with residents of the study areas.

This study focuses on the BR-262 roadway, specifically the section located in the state of Minas Gerais. The choice is justified by the roadway's importance as a national transportation axisr in Brazil's territorial structuring. It is among the ten longest roadways in the country, stretching 2,394.40 km in the E-W direction, and covers the states of Mato Grosso do Sul, São Paulo, Minas Gerais, and Espírito Santo. The BR-262 is thus a continental roadway that is

essential for the distribution of agricultural and livestock production in Brazil and South America.

In Minas Gerais, the BR-262 stretches 901.60 km. The section begins at the junction with BR-153 – Transbrasiliana roadway in the municipality of Comendador Gomes, crosses 38 municipalities, and ends at the junction with the MG-329(A) roadway on the border with the state of Espírito Santo, near the city of Martins Soares. This stretch of roadway was chosen due to the social and economic diversity present in the region and, consequently, along the selected route. The state enjoys a privileged location: it serves as the link between the Northeast, Midwest, and Southeast macro-regions, which exhibit signification variation in population density, socioeconomic development, and income levels.

The development of the state synthesizes some of the characteristics of national development, particularly due to regional diversity (Balbino *et al.*, 2019). In addition to its strategic economic importance, BR-262 stands out as a representation of the social and economic diversity found in Minas Gerais, which can be observed through an analysis of the mesoregions it crosses. The area that is the subject of this study is characterized by physical continuity, but it is also marked by singularities (Lencioni, 2003).

The state's five mesoregions, which are crossed by the roadway, have distinct relationships with it. In the Triângulo Mineiro, the flows generated by and intensified through the roadway have historically played a key role in driving rapid growth and development in the region, particularly in the agribusiness sector. *The Oeste de Minas* and *Central Mineira* mesoregions shade very similar social, economic, and cultural realities, characterized by the migratory flow driven by industries. The Metropolitan Region of Belo Horizonte, on the other hand, is marked by the state's highest level of economic development and intense commuter traffic, which reinforce the interdependence among municipalities. Meanwhile, the Zona da Mata, which exhibits the lowest economic dynamism among the analyzed mesoregions, is the one least influenced by the roadway.

The BR-262 roadway can be considered a territorial landmark in Minas Gerais. An imaginary line proposed in a report by the João Pinheiro Foundation (FJP, 2005) divides the state into two halves. The

first half, shown in pink in Figure 1, consists of municipalities that require public policy investments for local development, while the second, shown in orange, includes municipalities with better economic conditions, the capacity to leverage received investments, and higher population growth driven by migration. Although the BR-262 roadway does not run exactly along the FJP's imaginary line, if we consider that the roadway has a zone of influence extending from it, this division becomes apparent. Thus, even though there are significant economic, social, and traffic differences among the five mesoregions crossed by the roadway, it is possible to identify a pattern of greater economic development within its zone of influence—an axis that promotes urban restructuring, attracts investments from the physical-geographical perspective, and drives transformations along the roadway and in its vicinity.

**Figure 1:** Division of the territory of Minas Gerais according to the João Pinheiro Foundation. *Source: prepared by the author based on data from IBGE (2020) and the João Pinheiro Foundation (2005)*

Currently, the roadway has three duplicated sections in the state of Minas Gerais: the Celso Mello Azevedo Ring Road (1967-1980), Nova Serrana – Betim (2009-2011) and Uberaba – Campo

Florido (2014-2015). By enabling a post-construction and post-duplication analysis, the study examined the relationship between the roadway and the urban fabric in the municipalities located at the ends of the duplicated sections. These are: the Betim, Contagem, and Belo Horizonte conurbation, in the Metropolitan Mesoregion of Belo Horizonte; Nova Serrana, in the West of Minas Gerais, and Uberaba and Campo Florido, both in the Triângulo Mineiro, as can be seen in Figure 2.

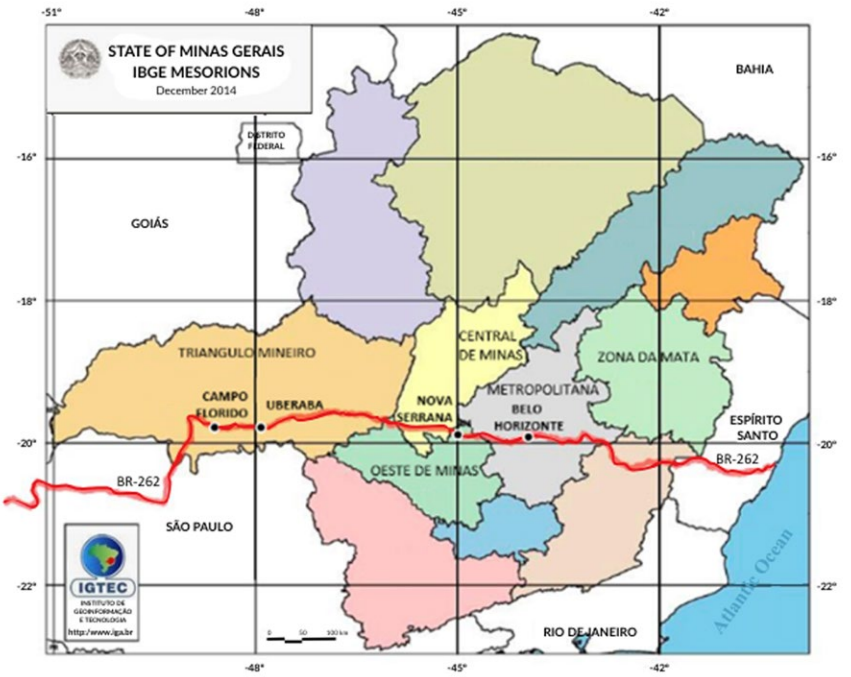



**Figure 2:** Location of the municipalities of Campo Florido, Uberaba, Nova Serrana and Belo Horizonte in the state of Minas Gerais on the base map of the IBGE Mesoregions. *Source: adapted by the author from Governo de Minas Gerais, 2014.*

This sample, in addition to comprising different mesoregions of the state, allows for a diverse analysis, as it includes municipalities of varying sizes, levels of state importance, and population densities, as shown in Table 1. This diversity makes it possible to observe different relationships between road infrastructure and urban development.

| MUNICIPALITY | POPULATION (INHABITANTS) | POSITION IN THE STATE | % POPULATION | POPULATION DENSITY |
|---|---|---|---|---|
| **Campo Florido** | 8,269 | 410 | 0.04 | 6.70 inh/km² |
| **Nova Serrana** | 105,520 | 29 | 0.51 | 373 inh/km² |
| **Uberaba** | 337,092 | 7 | 1.64 | 74.68 inh/km² |
| **Betim** | 378,089 | 5 | 1.84 | 1,197.01 inh/km² |
| **Contagem** | 603,442 | 3 | 2.94 | 3,193.20 inh/km² |
| **Belo Horizonte** | 2,575,151 | 1 | 12.54 | 6,988.18 inh/km² |
| **Minas Gerais** | 20,539,989 | | 100 | 35.02 inh/km² |

**Table 1:** Population and demographic density data of the municipalities analyzed. *Source: Prepared by the author based on data from IBGE Cities.*

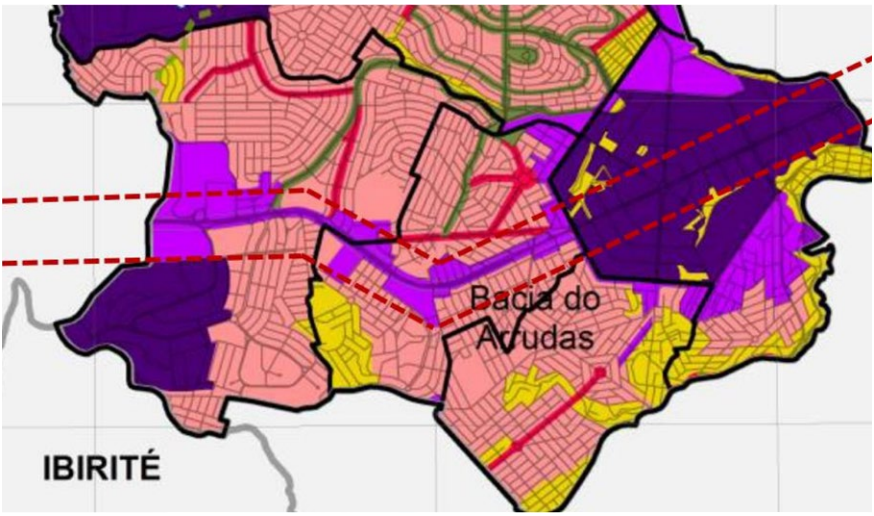
## *THE ROADWAY IN PLANNING*

The city's current relationship with the roadway aligns with Zioni's (2020) understanding of 21st-century productive restructuring, in which there is no longer a distinction between regional and urban areas. BR-262 plays both a regional a municipal role, integrated into the urban fabric. The overlap of different scales and sectors that make up the space poses a challenge for planning, since the same infrastructure serves several of them.

The lack of integration in public policies is evident in the master plans of the conurbations of Belo Horizonte, Contagem, and Betim. There are several plans for this area: Belo Horizontes Urban Mobility Plan (2019), Master Plan for the Integrated Development of the Belo Horizonte Metropolitan Region - PDDI-RMBH (2009-2011), Betim Master Plan (2018), Contagem Master Plan (2018), and Belo Horizonte Master Plan (2020). Similarly, they propose the creation of axes along the roadway axis, a conservative model of industrial zoning alongside transportation infrastructure.

However, plans that focus on the territory highlight the disconnect between different planning scales and between neighbo-

ring municipalities. Each plan has its own zoning, and as can be seen in the Macro-Zoning of the Contagem Master Plan in Figure 3, the plan represents a break, as if the administrative boundary were in fact a discontinuity in the territory. However, this interpretation does not correspond to the reality of conurbated municipalities, in which, when traveling, one cannot distinguish when one is in one municipality or another, as there is no significant change in the urban fabric.




**Fgure 3:** Excerpt from the macro-zoning plan for Contagem. *Source: adapted by the author from the Macro-Zoning Map of the Contagem Master Plan,71 2018.*

In Uberaba's current Master Plan (2006), the BR-050 and BR-262 roadways are identified as the main components of the municipality's mobility system—that is, they are integrated into urban planning. In the Plan, the roadways appear as axes of expansion and growth, with 500- to 1,000-meter-wide strips on each side designated for business development, with the aim of "stimulating the economic development of the Municipality and the dissemination of a positive image of Uberaba with the use of the privileged location due to the ease of access to the roadways." (Prefeitura de Uberaba, 2018, p.114).

The strategy of creating a specific land-use axis along the roadway, as outlined in the Master Plans for Uberaba, Betim, and Contagem was also applied in Campo Florido, where the creation of economic development axes is planned. These are strips extending up to 1,000 meters from the roadways, designated for the development of business parks for large and medium-sized companies, demonstrating that the municipality follows the logic of large cities. However, the plan does not take into account the unique characteristics and uses of the existing roadway in Campo Florido. If the 1,000-meter zones were implemented, practically the entire city would be designated for this use, as can be seen in Figure 4. This fact runs counter to the established land use and the occupation and land use proposed by the law itself.

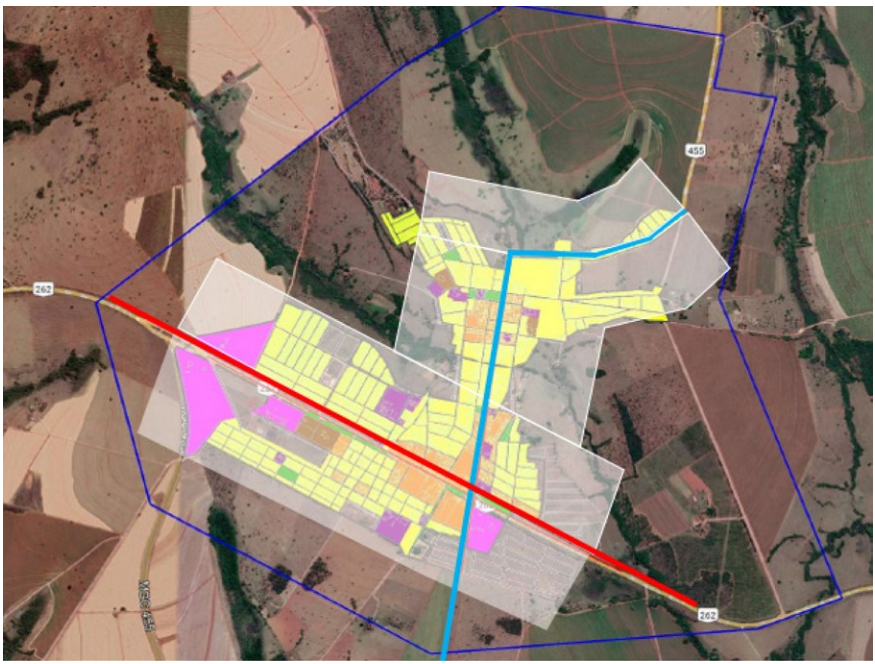



**Figure 4:** Marking of the 1,000-meter axis from the federal roadway (BR-262, in red) and the state roadway (MG-455, in cyan) as provided for in the Municipal Master Plan – marking carried out on the Land Use and Occupation map of the Plan itself. *Source: adapted by the author from Campo Florido Master Plan, 2022.*

In Nova Serrana, we have the most iconic case of a lack of dialogue between infrastructure and the city in urban planning. The BR-262 roadway is marked on the Master Plan map, but it is not taken into account when zoning areas and establishing guidelines, and is not even mentioned in the text of the Master Plan. These cases demonstrate that, under the current planning model, the opportunity to think about the city in a multiscale manner based on the roadways that structure cities is lost, which results in problematic roadway-city intersections.

## *IMPACT OF THE ROADWAY ON THE URBAN FABRIC*

The intensification of traffic flows on interregional transportation routes, driven by increased trade, combined with the fragmentation of the urban fabric, has led to an increase in conflicts of scale between roadways and cities. This occurs because regional and urban flows and land use coexist in the same space, and the roadway functions not only as a road, but as an obstacle to be crossed, due to the complexity of its traffic.

In Nova Serrana, the roadway is a major disruption to the urban fabric, as it divides the city into "two sides". According to former State Representative Fábio Avelar, "Nova Serrana is cut in two by roadway 262; practically speaking, today roadway 262 is (sic) in the center of Nova Serrana—it cuts the city in half. On one side there are 70,000 residents, and on the other side there are 50,000 residents". This statement makes clear the urban and social segregation caused by the roadway causes. The barrier that the roadway represents for the urban fabric is also a social barrier, since the population that occupied the "other side" of the roadway was precisely the one that was expelled from the established city to a marginalized area. Access between the two sides of the city was provided by a single interchange, as can be seen in Figure 5. The interchange was marked by heavy and chaotic traffic, and many accidents occurred there. Because of this, an urban legend arose that the stretch was haunted.

**Fiigure 5:** Old Nova Serrana interchange. *Source: adapted from Instagram @novaserrana_mg, 2020.*

To address the safety issue at the intersection, two overpasses were built—one in 2005 and the other in 2014. There was a significant reduction in the number of accidents; however, the underpasses proved to be a sectoral solution that intensified the fragmentation of the urban fabric, created a barrier effect, and increased the social distance between the physically connected areas, as can be seen in Figure 6.

**Fiigure 6:** First trench in Nova Serrana. *Source: Instagram @novaserrana_mg, 2020.*

Along the nearly 40 km of BR-262 that crosses the conurbated municipalities of Betim, Contagem, and Belo Horizonte—known as the Celso Melo de Azevedo Ring Road—the surrounding area is extremely busy and diverse. Industrial use shares space with many others types of development, such as commercial areas linked to the roadway, as well as formal and informal residential areas, with houses along the roadside, as can be seen in Figure 7. Despite its importance as regional and national infrastructure for the transport of good and people, the ring road constitutes an obstacle and forms a barrier to the urban fabric, due to its lanes, medians, low walls, overpasses, and few footbridges, as it disrupts the local network of physical circulation and social relations. This contributes to the degradation of the urban space. As a result, the area becomes hostile to human occupation, generating various problems such as air, water, noise, and visual pollution, as well as difficulties in safe access to public facilities. This stretch is one of the 100 with the higher number of traffic-related deaths in Brazil (CNT, 2017).

**Figure 7:** Irregular occupations on the margins of the Celso Melo de Azevedo Ring Road. *Source: Tôrres (2013).*

In Uberaba, the situation is similar. Despite growth extending beyond the roadway, it still acts as an urban barrier, given the physical division created by median strips and few access points.

Land use the surroundings is related to the roadway's function, including gas stations, restaurants, hotels, trucking companies, and supermarkets. The outer side is predominantly occupied by housing of various types, ranging from low-income housing developments to luxury condominiums.

**Figure 8:** BR-262 in Uberaba. *Source: G1 MG (2020).*

In Uberaba, Nova Serrana, and the Betim–Contagem– Belo Horizonte conurbation, the roadway's role stands out when observing the urban fabric. It is as if the city had to adapt to the roadway's function, which prevails and segregates the urban fabric. In addition, this urban configuration favors motorized vehicles transportation, making it an inhospitable environment for pedestrians.

A distinctive feature of Campo Florido's relationship with the roadway is that it is perceived in the landscape as a local thoroughfare for daily commerce, rather than as a roadway. It is the city's main commercial hub, and along it one finds not only transportation-related activities, such as gas stations and auto repair shops, but also a diverse range of businesses, including supermarket, bakeries, butcher shops, pharmacies, churches, and den-

tal offices, among others. This fact characterizes it as a “market road”, a concept created by Domingues (2009) to describe the linear urbanization that takes place along the road, in which flows and uses intermingle.

**Figure 9:** BR-262 in Campo Florido. *Source: Google Street View (2025).*

In all the cities analyzed, the roadway handles different traffic volumes, serving as a roadway for regional traffic as well as for people’s daily commutes. BR-262 has become a clear example of what Domingues (2009) calls a “road-street”, in which passing traffic on the roadway mixes with daily commuter traffic, much like on a street, creating a constant conflict. This dynamic provides a clear example of the conflict that Domingues (2009) identifies with road-streets, which are too fast for those who live there and too congested for those who pass through.

The conflict of scales creates problematic roadway-city intersections and consolidates roadways as a barrier, an obstacle within the urban fabric. roadways in an urban space enhances these impacts, since it exposes the population to all the risks associated with roadways (Brasileiro *et al.*, 2014), which leads to social segregation, violence, and increased pollution and accident rates.

## *THE INFLUENCE OF ROADWAYS ON URBAN SPRAWL*

Urban sprawl is defined by Reis Filho (2006) as the phenomenon of the increasing spread of urbanization throughout the territory, characterized by the fragmentation of urban centers beyond the limits of the established city. It moves towards the periphery, with a decrease in density in some already stablished areas and the expansion of urbanized areas and metropolitan spaces to increasingly larger territorial scales, characterized by high interdependence and mobility (Reis Filho, 2006).

In Nova Serrana, public investments in infrastructure—such as the connection to the Cemig power grid in 1967 and the opening of the BR-262 to traffic in 1969—spurred an increase in the number of factories and population growth. For decades, the municipality has been the fastest-growing in Minas Gerais, due to its strong appeal to migrants (IBGE, 2010). The population growth caused the urban fabric to expand, thereby altering its relationship with the BR-262 roadway. Figure 10 depicts the 1980s, showing the roadway, marked in red, on a plateau, far from the urban area of that time.

**Figure 10:** Municipality of Nova Serrana (1980), the BR-262 is the red strip in the background. *Source: adapted from Instagram @novaserrana_mg, 2021.*

This expansion is illustrated in Figure 11, which highlights the urban areas in 1985 (cyan) and 2020 (red). In 1985, the urban area was located only south of the BR-262. Over the years, population growth caused the city to expand and cross the barrier represented by the roadway. This highlights the shift in the city's location, which expanded towards the roadway.

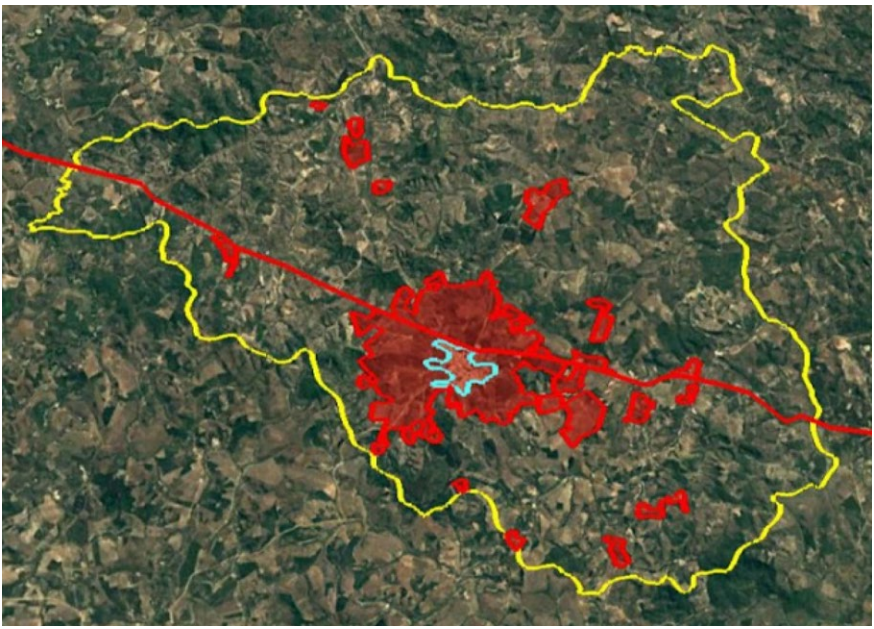


**Figure 11:** Satellite image of the municipality of Nova Serrana – urbanized areas between 19851 (in cyan) and 2020 (in red).
*Source: adapted by the author from Google Earth image, 1985.*

A comparison was also made between satellite images from 2008 and 2020—a 12-year period—to understand how urban growth occurred following the duplication of the roadway section connecting the city to Betim. Marked in red in Figure 12 are all the subdivisions that emerged during this period, some of which are fully developed with many buildings; others, with only the road layout. The image clearly shows urban expansion throughout the territory;

1 Oldest image available on Google Earth.

however, it is not possible to identify a pattern for the growth of the urban fabric, as it occurs in all directions and does not respect the urban perimeter established in the 2007 Master Plan (yellow polygon in figure 12).

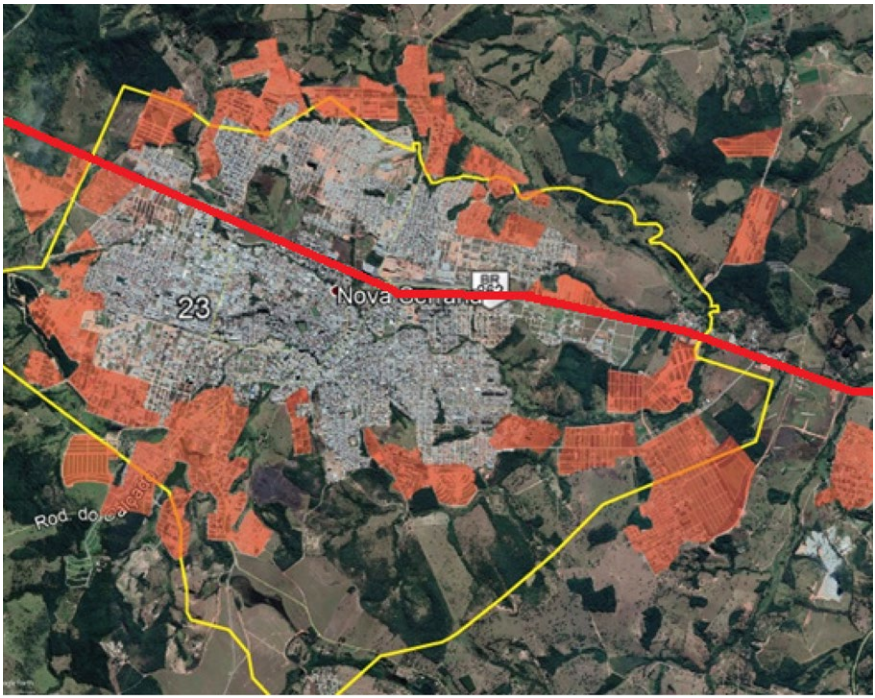



**Figure 12:** New allotments between 2008 and 2020. *Source: adapted by the author from Google Earth image, 2023.*

The urban evolution of the Betim–Contagem–Belo Horizonte is shown in Figure 13. The three municipalities are outlined in yellow, the BR-262 is marked in red, and the increase in land use between 1985 and 2020 is also shown in red. In all three cities, territorial expansion occurred almost continuously from the existing settlement, without the creation of vacant areas. This phenomenon represents the sprawl, characterized, according to Reis Filho (2006), by the increasing fragmentation of the urban fabric beyond the boundaries of the consolidated city, towards its peripheral

areas. However, in Betim, there are also expanded centers and gaps, with the emergence of isolated neighborhoods within the context of the consolidated city (Reis Filho, 2006).

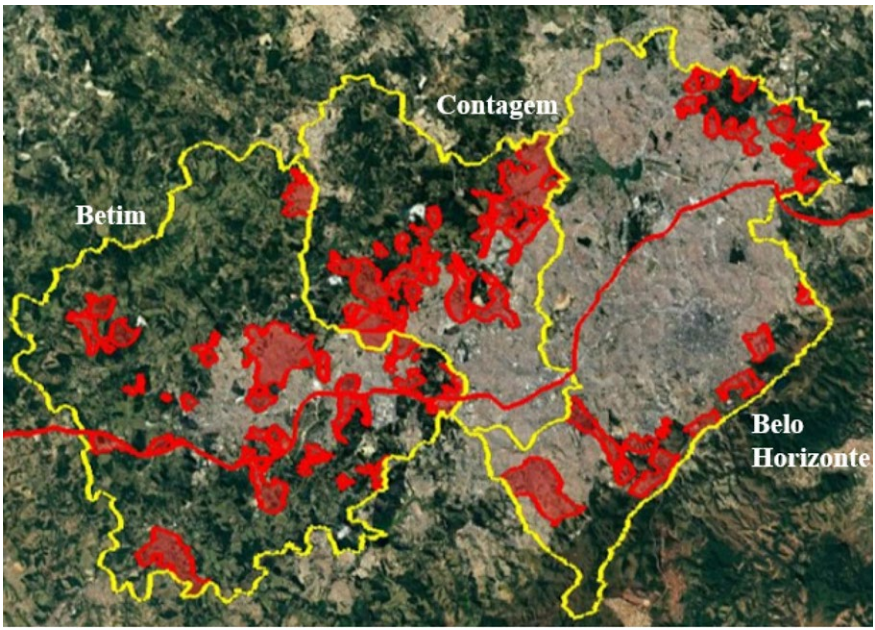



**Figure 13:** Conurbation of the municipalities of Belo Horizonte, Betim and Contagem – comparative occupation from 1985 to 2020 and delimitation of urban perimeters. *Source: adapted by the author from Google Earth image, 1985; 2020.*

To analyze the role of BR-262 in the urban layout of Uberaba, the foundation map of urban subdivions, produced by Minaré (2022), was used, which shows the evolution by decade between 1930 and 2020 and can be seen in Figure 14. Until the 1960s, when the BR-262 was paved, it served as a sort of arch to the south. Over time, the city expanded in all directions and incorporated the roadway as an urban thoroughfare.

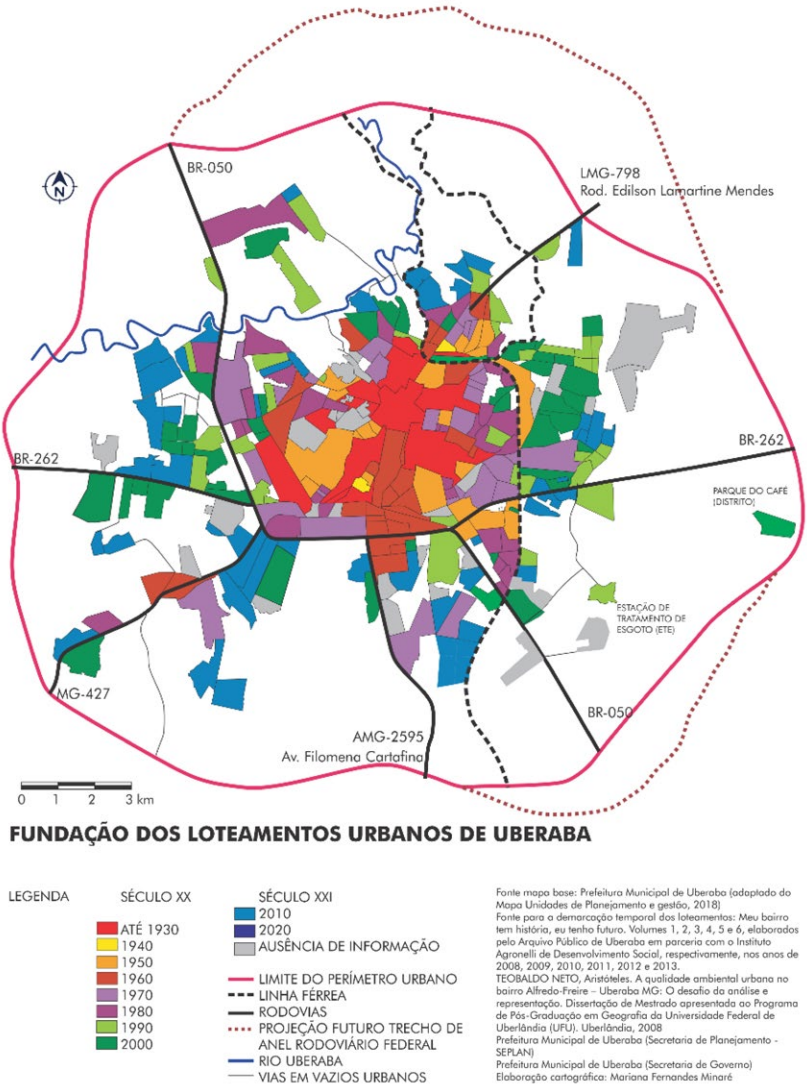



**Figure 14:** Foundation of urban subdivisions in Uberaba.
*Source: Minaré, 2022.*

An analysis of Campo Florido's urban development over time reveals an interesting situation. The land use pattern in 1985 (shown in cyan in Figure 15) depicts the town's historic center in the northeast and an expansion extending toward roadway BR-262, which extends beyond it. The urban expansion that occurred over

these 35 years (marked in red in Figure 15) took place along both sides of the roadway, highlighting the roadway's role as a magnet for urban expansion.

**Figure 15:** Comparison of the evolution of Uberaba's urban area between 1985 and 2020. *Source: adapted by the author from Google Earth image, 1985; 2020.*

In all the cases analyzed, it was found that the roadway attracts a variety of land uses to its axis, which are areas of more intense land use and higher density. However, urban sprawl also occurs in other directions, and its influence is subject to other factors. Thus, it is not possible to establish a direct relationship between the roadway and urban sprawl. At the same time, the dispersed urban fabric increases the distances between urban centers and, as a result, also increases dependence on road transport, which, in turn, increases pollution emitted by motor vehicles. Furthermore, the existence of urban voids makes the city less safe for walking. Another relevant factor is that urban sprawl expands the area occupied by the city, which can encroach on areas that were previously of environmental interest, reducing forest reserves and watershed forests.

## THE INFLUENCE OF THE ROADWAY ON METROPOLIZATION

As daily life becomes increasingly regionalized, everyday interactions shift from being purely local to becoming regional. This spreads metropolitan lifestyles and consumption patterns and increases dependence on road infrastructure—particularly road networks—thereby creating a pattern of metropolization (Reis Filho, 2006).

The section of BR-262 that overlaps with BR-381 and the Belo Horizonte ring road, known as Celso Mello Azevedo, is of strategic importance to the state's industrial production. It is home to the Juventino Dias Industrial Complex, the Gabriel Passos refinery, and the Fiat plant. For this reason, it was the first sextion of BR-262 to be duplicated, between 1967 and 1980. In the urban conurbation formed by Betim, Contagem, and Belo Horizonte, BR-262 serves not only as a regional scale but also an urban-regional one, contributing to the metropolization of daily life of these municipalities.

A study conducted by the Observatório das Metrópoles found that, between 2000 and 2010, there was an increase in integration levels within the Metropolitan Region of Belo Horizonte (RMBH). This finding demonstrates the growing metropolitan dynamics among all 34 municipalities that make up the RMBH.

The duplication of the section connecting Nova Serrana to Betim reinforces Pottier's (1963) assertion that the roads that receive improvements are those of greater strategic importance. The duplication work of the Nova Serrana-Betim section between 2009 and 2011 made the journey to the metropolitan up to 20% faster and strengthened the connection with Belo Horizonte. The improved traffic flow, driven by the expansion of factories into neighboring municipalities and the commuting of workers, has enabled the development of the footwear industry cluster, which impacts the entire micro-region.

The commuting movements and regionalization of daily life, with the surrounding municipalities playing a role in Nova Serrana's urban dynamics, serve as an example of a city in which "metropolitan space is not exclusive to the metropolis nor confined to the borders of a metropolitan region" (Lencioni, 2013, p.17).

The widening of the stretch of road connecting Uberaba and Campo Florido in 2014 enhanced the "regionalization of daily life" that has always existed between the two cities. One interviewee, who has ties to both cities, remarked that "my whole life has been on the road", because of the way it has always been incorporated into his daily routine.

The relationship between the two cities, as in Nova Serrana, is yet another example of how metropolitan dynamic are no longer exclusive to the metropolis or the institutionalized metropolitan region, as noted by Lencioni (2003). After the road was widened, the journey became even faster. Residents report that the trop, which used to take 50 minutes, now takes 40 minutes.

There is a significant daily commute of people leaving Campo Florido to study and work in Uberaba, and a system of chartered buses has been established to meet this demand. There are also occasional trips by people seeking more specialized medical care—since the town does not have a hospital—as well as trips for everyday shopping.

This structure reinforces Uberaba' influence over Campo Florido. However, according to local merchants, sales have declined since the road was duplicated, as the ease of access leads people to prefer shopping in Uberaba. This demonstrates that infrastructure improvements does not always lead to local development, and that they can create a relationship of dependence that is not beneficial.

Another peculiarity of this section is that it was not widened because it was the stretch of greatest economic interest, as Pottier (1963) notes. The concession contract was awarded to the Triunfo-Concebra company for duplication works in the state of Minas Gerais, covering a total of 724 km. It was stipulated that the company had to complete 10% of the project in order to begin operating the roadway commercially and collecting tolls. The company chose to start the work on the 73-km section with the lowest traffic volume. which was simpler to construct because it did not require engineering structures such as bridges and overpasses and was, consequently, less expensive. After its completion, tolls collection began along the entire length of the roadway at the points specified in the contract; however, since the completion of this section,

no further construction or significant investments have been made on the roadway, resulting in this being the only section widened under this contract.

The increase in traffic on the roadway, caused by motor vehicles, leads to higher levels of pollution and greenhouse gas emissions, which contributes to global climate change.

## CONCLUSION

This study sought to examine the impact of roadways on cities. Its subject for study was the BR-262 axis located in Minas Gerais, a relationship that is replicated in other Brazilian cities also traversed by roadways. Currently, the roadway traffic flows are increasingly intense and exceed exclusively regional freight flows, which incorporates them into functions related to urban dynamics, with daily commutes of people on a regional and city scale.

Throughout this study, the strategic importance of the BR-262 roadway in Minas Gerais has been demonstrated, particularly its role as a development axis. These findings establish the BR-262 as a strategic driver of wealth and influence that is of great importance for regional development. This demonstrates that BR-262 plays a significant role in the concentration of wealth, in addition to being strategic for attracting investments.

In the existing relations between the municipalities of Betim, Contagem, and Belo Horizonte; between Nova Serrana and Belo Horizonte; and between Uberaba and Campo Florido, BR-262 roadway serves as critical infrastructure, as it enables quality of life and social well-being by providing essential services across a wide range of sectors, such as health, social care, education, transportation, energy, telecommunications, public safety, and emergency services. (World Bank, 2021). In the cases analyzed, increased traffic flows and urbanization were driven by improvements in infrastructure quality.

However, the increase in traffic flows has varying impacts—not necessarily positive ones—on municipalities. The intensification of traffic flows and interdependence among municipalities also contributes to increased pollution and greenhouse gas emissions, since the increased traffic consists of motor vehicles, often for individual use.

It was also found that the roadway contributes to urban sprawl, as it intensifies land use along its axis. However, it is not possible to establish a direct link between the roadway and urban sprawl, , since its influence is subject to other factors. Urban sprawl to the occupation of areas increasingly distant from the established urban core, which increases the city's maintenance costs, as it becomes necessary to extent infrastructure to increasingly distant locations.

Urban sprawl also has environmental impacts. In many cases, expansion occurs in areas designated for environmental preservation, and the destruction of these areas leads to consequences such as reduced biodiversity, impacts on the water cycle and thermal regulation, increased greenhouse gas emissions, and increased soil impermeability. Another negative environmental consequence of urban sprawl in the environment is that the increased distances between urban centers heighten dependence on road transport, which generates pollution from motor vehicles.

The study highlights the need to develop public policies that combat urban sprawl through land-use guidelines along the roadway axis and enforcement of compliance with the Master Plan and against irregular settlements, as well as actions that enable the adaptation to or minimization of negative environmental impacts on infrastructure—that is, that promote resilience—such as risk management and recovery plans following adverse events and the mapping of high-risks areas.

Another important finding in the effort to understand the roadway's impact on the city from a public policy perspective was the absence of legislation that integrates the multiple scales covered by the roadway and its influence on national, state, metropolitan, regional, and municipal dynamics. In national roadway projects, there is no reference to the urban fabric. On the other hand, in none of the municipal master plans analyzed include guidelines or proposals for the intersection of the roadway—a national-scale infrastructure—with the urban scale.

The absence of an urban design that integrates different scales results in sector-specific solutions, which creates a conflict of scales, as well as barriers and scars in the urban fabric. Problematic roadway-city intersections, with high rates of accidents and pollu-

tion, violence, irregular settlements, and roads that are, as described by Domingues (2009), too fast for those who live there and too congested for those who pass by, are the representation of this scalar conflict. It is therefore necessary for planning to occur in a coordinated manner, in order to integrate roadways and urban intersections, as well as climate change, to their different scales, so as to reduce environmental impacts and promote the resilience of the transportation sector in Brazil.

## REFERENCES


AVELAR, F. **Speech by the State Deputy at a public hearing held to discuss the new concession of BR-262**. Hearing held on December 1, 2022.

BALBINO *et al*. The Brazilian economy in the state of Minas Gerais: An analysis of the socioeconomic inequalities of the Minas Gerais space in the light of its economic formation. In: **Anais 8º Enanpur**, Natal, 2019.

BRASILEIRO, L. A.; SCHIAPATI, R. S.; COMAR, L. C. **The Influence of roadways in the Urban Area**. In: Revista Nacional de Gestão de Cidades , [S. l.], v. 2, n. 13, 2014. DOI: 10.17271/23188472213201476 3. Available at: <https://publicacoes.amigosdanatureza.org.br/index.php/gerenciamento_de_cidades/article/view/763>. Accessed on: 14 Apr. 2022.

COSTA, M. de L. P. M. Urbanization and Its New Connotations – rebates on the process of restructuring the territory. In: REIS, N. G.; BENTES, J. C. da G. (organizers) **Ten years of dialogues on urban dispersion**. São Paulo: FAUUSP, 2017, p. 177-197.

DOMINGUES, Álvaro. **The street of the road**. Porto: Dafne Editora, Livros de Arquitetura, 2009.

JOÃO PINHEIRO FOUNDATION. **The economy of Minas Gerais in 2019**. ISBN: 2595-6132, Belo Horizonte: FJP, 2020. Available at: <http://fjp.mg.gov.br/wp-content/uploads/2020/05/A-Economia-de-Minas-Gerais-em-2019_.pdf>. Accessed on: 9 out. 2020.

JOÃO PINHEIRO FOUNDATION. **Minas Gerais Social Responsibility Index**. 2016. Available at: <http://imrs.fjp.mg.gov.br/Perfil>. [data with variable dates] Accessed on: 25 Aug. 2020.

GOVERNMENT OF MINAS GERAIS. **Geographic location**. Available at: <https://www.mg.gov.br/conteudo/conheca-minas/geografia/localizacao-geografica>. Accessed on: 23 May. 2021.

G1 MG. **Improvement project for the urban stretch of BR-050 in Uberaba is presented by the concessionaire. 2020.** Available at: https://g1.globo.com/mg/triangulo-mineiro/noticia/2020/07/07/projetos-de-melhorias-para-trecho-urbano-da-br-050-em-uberaba-e-apresentado-por-concessionaria.ghtml. Accessed on: 19 out. 2025.

BRAZILIAN INSTITUTE OF GEOGRAPHY AND STATISTICS (Brazil). **Population arrangements and urban concentrations in Brazil (2016)**. Available at: <www.ibge.gov.br/apps/arranjos_populacionais/2015>. Accessed on: 9 out. 2020.

BRAZILIAN INSTITUTE OF GEOGRAPHY AND STATISTICS (Brazil). **Census (2010)**. Available at: <https://www.ibge.gov.br/estatisticas/sociais/rendimento-despesa-e-consumo/9662-censo-demografico-2010.html?=&t=sobre> . Accessed on: 21 set. 2021.

BRAZILIAN INSTITUTE OF GEOGRAPHY AND STATISTICS (Brazil). **Census (2022)**. Available at: <https://www.ibge.gov.br/estatisticas/sociais/populacao/22827-censo-demografico-2022.html?=&t=resultados> . Accessed on: 21 set. 2021.

BRAZILIAN INSTITUTE OF GEOGRAPHY AND STATISTICS (Brazil). **IBGE Cities**. Available at: <https://cidades.ibge.gov.br/>. Accessed on: Accessed on: 9 out. 2020.

LENCIONI, S. Metropolização do espaço: processos e dinâmicas. In: FERRERIA, A.; RUA, J.; MARAFON, G. J.; SILVA, A. C. P. (organizers). **Metropolization of space. Territorial**

**management and urban-rural relations**. Rio de Janeiro: Consequence, 2013, pp 17-34.

LENCIONI, S. **Região e Geografia**. 2nd ed. São Paulo: Edusp, 2003.

LIMA, M. G. (2023). **Highway and city: the BR-262 Highway in Minas Gerais and its urban-regional aspects**. Master's thesis. São Carlos-SP, University of São Paulo.

MINARÉ, M. F. (2023). **Infrastructure and planning in the urbanization process of Uberaba-MG**. Master's thesis. São Carlos-SP, University of São Paulo.

POTTIER, P. **Communication axes and economic development**. In: Revue économique, volume 14, n°1, 1963. pp. 58-132. Disponível em: <https://www.persee.fr/doc/reco_0035-2764_1963_num_14_1_407543>. Acesso em: 13 Jan 2022.

BELO HORIZONTE CITY HALL. **Master Plan of Belo Horizonte** [Land Occupation]. Belo Horizonte, 2020. Available at: <https://prefeitura.pbh.gov.br/sites/default/files/estrutura-de-governo/politica-urbana/2020/e-book_ocupacao_modulo01.pdf>. Accessed on: 25 out. 2022.

CITY HALL OF BETIM. **Master Plan of Betim**. Betim, 2017. Available at: <http://www.dpurb.betim.mg.gov.br/site/index.php/legislacao-2/plano-diretor/>. Accessed on: 25 out. 2022.

CAMPO FLORIDO CITY HALL. **Campo Florido Master Plan**. Campo Florido, 2022. Available at: <https://campoflorido.mg.gov.br/plano-diretor/>. Accessed on: June 14, 2022.

MUNICIPALITY OF CONTAGEM. **Contagem Master Plan** [Annexes: Zonings and Guidelines]. Contagem, 2018. Available at: <https://www.contagem.mg.gov.br/arquivos/legislacao/lec002482017_anexos-20180112090505.pdf>. Accessed on: 25 out. 2022.

CITY HALL OF NOVA SERRANA. **Master Plan of the municipality of Nova Serrana**. Nova Serrana, 2007. Available at: <https://www.novaserrana.mg.gov.br/publicos/05_arquivos_1220171722370.pdf>. Accessed on: 15 nov. 2020.

CITY HALL OF UBERABA. **Master Plan of Uberaba**. Uberaba, 2018. Available at: <http://www.uberaba.mg.gov.br/portal/acervo/plano_diretor/arquivos/plano_diretor_e_legislacao_urbanistica/lei_plano_diretor/lc_359/lc_359.pdf>. Accessed on: 4 May. 2022.

REIS FILHO, N. G. **Notes on dispersed urbanization and new forms of urban fabric**. São Paulo, Via das Artes, 2006.

TÔRRES, C. **The Ring II Society**. BH-One photo a day, 2013. Available at: http://www.bhumafotopordia.com/2013/10/a-sociedade-do-anel-ii-uma-das-mais.html. Accessed on: 19 out. 2025.

WORLD BANK. **Making critical infrastructure resilient: an agenda for the G20**. Washington, DC: The World Bank, 2021.

ZIONI, S. **Dimensions of road and road circulation, aspects of urban mobility and its relationship with the structuring of the territory**. Class taught within the scope of the discipline: IAU 5856 “Special Topics: Urban infrastructure and environment – technical and urban parameters”, on August 24, 2020.

# PARTE IV

## PERSPECTIVAS DE RESILIÊNCIA E ADAPTABILIDADE PARA INFRAESTRUTURAS

# PART IV

## PERSPECTIVES OF RESILIENCE AND ADAPTABILITY FOR INFRASTRUCTURE

10

# DESENVOLVENDO CAPACIDADES ADAPTATIVAS AO SETOR DE TRANSPORTES EM UM FUTURO CLIMÁTICO INCERTO

GEORGE YUN,
ANDRÉA SOUZA SANTOS
E JEANCARLO ALBERTO DOS REIS

## RESUMO

Este capítulo examina os impactos das mudanças climáticas nas infraestruturas de transporte no Brasil, articulando três eixos analíticos principais: (1) mecanismos físicos de falha provocados por eventos climáticos extremos, como ondas de calor, precipitações intensas, elevação do nível do mar, secas prolongadas e ventos fortes; (2) vulnerabilidades sistêmicas e riscos em cascata, considerando interdependências críticas entre setores e fatores amplificados no contexto brasileiro, como o envelhecimento de estruturas e desigualdades socioeconômicas; e (3) estratégias para construção de capacidade adaptativa transformacional, incluindo governança multinível, incorporação de projeções climáticas no planejamento urbano,, inovações em ciência de dados, tecnologias (IoT, sensoriamento remoto) e materiais resilientes, políticas regulatórias, financiamento inovador e gestão proativa de riscos. A partir de uma revisão crítica da literatura e análise de casos recentes, como as secas na Amazônia e as inundações no Rio Grande do Sul, argumenta-se que a adaptação deve integrar princípios de justiça climática, com abordagens incremental e transformacional, além de metodologias econômicas robustas para maximizar o Triplo Dividendo da Resiliência. Conclui-se que a resiliência duradoura exige políticas integradas que transcendam paradigmas tradicionais, promovendo

DOI: 10.66949/q5h8b1m7

equidade social, sustentabilidade e redução de perdas econômicas em um futuro climático incerto.

**Palavras-chave**

Infraestrutura Crítica, Capacidade Adaptativa, Justiça Climática, Resiliência Climática.

## 1. INTRODUÇÃO

As mudanças climáticas representam um desafio crítico para o século XXI, impactando profundamente infraestruturas de transporte, que funcionam como a espinha dorsal da economia global e da conectividade social — entendida como a integração das relações sociais e econômicas sustentadas pela infraestrutura de transportes, sendo assim fundamental para a coesão social e o funcionamento econômico diante dos impactos das mudanças climáticas.

No Brasil, onde o transporte é vital para o desenvolvimento econômico e a integração regional, essas infraestruturas enfrentam vulnerabilidades crescentes devido a eventos climáticos extremos, como as inundações de 2024, no Rio Grande do Sul, que danificaram pontes, rodovias e o Aeroporto Internacional Salgado Filho, e as secas históricas na Amazônia, que interromperam a navegação fluvial, essencial para comunidades ribeirinhas. Entre 1995 e 2014, o país registrou prejuízos de R$ 26,9 bilhões em danos causados por fatores climáticos a infraestruturas , evidenciando a urgência de medidas adaptativas (World Bank, 2017).

Este capítulo vai além da simples identificação de impactos e soluções, propondo uma análise integrada dos mecanismos físicos de falha, das vulnerabilidades sistêmicas e das estratégias necessárias para construir uma capacidade adaptativa transformacional. A magnitude e a incerteza climática apenas reforçam que as infraestruturas existentes são insuficientes e, por isso, é crucial repensar o planejamento, o projeto, a governança e o financiamento dos sistemas de transporte, para garantir uma resiliência duradoura, equidade social e sustentabilidade, em meio a um futuro climático incerto.

## 2. MUDANÇAS CLIMÁTICAS E SEUS EFEITOS NAS INFRAESTRUTURAS DE TRANSPORTE

As mudanças climáticas representam uma ameaça crescente às infraestruturas de transporte, impactando rodovias, ferrovias, portos e hidrovias, por meio de mecanismos físicos complexos, como ondas de calor, chuvas intensas, elevação do nível do mar, secas prolongadas, ventos fortes e degelo do *permafrost*. Esses fenômenos causam danos significativos, como deformações em pavimentos asfálticos, flambagem de trilhos, colapso de pontes, inundações costeiras e interrupções na navegação fluvial, comprometendo a funcionalidade de sistemas essenciais para a economia e a conectividade social (Jaramillo *et al.*, 2022; de Abreu, *et al.*, 2022; AdaptaVias, 2023; Ukkusuri *et al.*, 2024).

### 2.1. Efeitos convergentes entre Ondas de Calor e Altas Temperaturas

O aumento das temperaturas e ondas de calor impactam severamente as infraestruturas rodoviária e ferroviária. Nas rodovias, o calor extremo reduz a viscosidade e rigidez do ligante asfáltico, um material viscoelástico suscetível a temperaturas acima de seu ponto de amolecimento (50°C a 80°C, alcançáveis na superfície do pavimento sob sol intenso). Essa redução causa deformações permanentes como afundamento em trilhas de roda (*rutting*), sangramento do ligante (*bleeding*) e aceleração da oxidação do asfalto, tornando-o mais frágil e propenso a rachaduras por fadiga (Joshi; Khan; Anand; Sen, 2024, P. 25; Bell; Gasparrini; Benjamin, 2024).

Em relação às ferrovias, trilhos de aço, altamente suscetíveis à expansão térmica, podem sofrer flambagem da via (*track buckling*) devido à tensão de compressão excedendo a resistência lateral do lastro, se não houver juntas de dilatação adequadas ou fixação robusta, representando um risco perigoso de descarrilamentos. (McGregor, 2024; Rahimitouranposhti *et al.*, 2025).

Ondas de calor na Europa, em 2019, danificaram pavimentos asfálticos em rodovias da Alemanha e França, causando rachaduras e deformações e levando a restrições de velocidade em ferrovias no

Reino Unido, devido ao risco de flambagem dos trilhos (Ukkusuri *et al.*, 2024, p. 253-256; Li; Ding; Gao; Ke, 2025, p. 761-775; G1, 2023).

No Brasil, as altas temperaturas no Centro-Oeste, especialmente em estados como Mato Grosso e Goiás, intensificam a deterioração de rodovias como a BR-163 — essencial para o transporte de grãos — com deformações por *rutting* e *bleeding*, enquanto ferrovias, como a Ferrovia Norte-Sul, enfrentam riscos de flambagem em trechos expostos a calor extremo, comprometendo a logística de exportação. (Ministério da Infraestrutura, 2021).

## 2.2. Efeitos Convergentes entre Ondas de Calor e Incêndios Florestais

Temperaturas extremas persistentes no Brasil Central, associadas à seca que torna a biomassa altamente inflamável, criam condições para incêndios florestais de grandes proporções, como os do Pantanal e da Amazônia. Esses incêndios destroem pontes de madeira em estradas vicinais, danificam pavimentos asfálticos e causam interdições prolongadas de rodovias importantes devido à baixa visibilidade pela fumaça densa, representando um risco agudo à segurança viária e aérea, com a sinergia negativa entre seca, calor e fogo promovendo destruição e interrupção no transporte. (Valor Econômico,2025; CNT,2019).

## 2.3. Principais ameaças climáticas na infraestrutura de transportes

### PRECIPITAÇÃO INTENSA:

Chuvas intensas, que superam a capacidade de infiltração do solo e dos sistemas de drenagem urbanos, geram escoamento superficial acelerado, intensificando a erosão e solapando fundações de pontes, viadutos e o subleito de rodovias e ferrovias. Em áreas montanhosas, a saturação do solo reduz a coesão entre partículas, diminuindo o ângulo de atrito interno e desencadeando deslizamentos de terra, que destroem trechos inteiros de infraestrutura.

Desastres no contexto internacional relativos à precipitação intensa incluem as inundações de 2021 na Alemanha e na Bélgica, que destruíram dezenas de pontes e mais de 600 km de linhas férreas (Bbc News Brasil, 2021; El País, 2021), evidenciando a vulnerabilidade de infraestruturas em países desenvolvidos a precipitações extremas. O fenômeno *El Niño Costeiro* no Peru, onde chuvas torrenciais geram fluxos violentos de água, barro, pedras e outros detritos que descem rapidamente por encostas íngremes durante chuvas intensas e de curta duração (*huaycos*), cortam a Carretera Central, paralisando o escoamento de minérios essenciais, como cobre e zinco.

No Brasil, as inundações no Rio Grande do Sul, em setembro de 2023 e abril de 2024, com destaque para o evento de 2024, causaram a cheia simultânea de rios da bacia do Guaíba. Como resultado, houve colapso de pontes cruciais, como a da BR-116, inundação do Aeroporto Internacional Salgado Filho, paralisação do transporte aéreo, bloqueio de centenas de trechos de rodovias por água, deslizamentos ou destruição do pavimento, isolamento de dezenas de municípios e interrupção do transporte de produtos agrícolas, como soja e milho, vitais para a economia.

## ELEVAÇÃO DO NÍVEL DO MAR

A elevação crônica do nível médio do mar e as marés de tempestade agudas ameaçam infraestruturas costeiras, como portos, estradas litorâneas e aeroportos, com inundações — permanentes ou frequentes — e intrusão salina, que corrói o aço de reforço no concreto e danifica componentes metálicos.

No contexto internacional, Jacarta, na Indonésia, enfrenta uma crise agravada pela elevação do nível do mar e subsidência do solo, tornando sua infraestrutura de transporte vulnerável e exigindo planos de realocação da capital.

No Brasil, o estudo da Agência Nacional de Transportes Aquaviários (ANTAQ) no ano de 2021, em parceria com a GIZ, identificou que 11 dos 21 portos públicos costeiros analisados — Aratu (BA), Paranaguá (PR), Rio Grande (RS), Santos (SP), São Francisco do Sul (SC), Cabedelo (PB), Fortaleza (CE), Imbituba (SC), Itaguaí (RJ), Recife (PE) e São Sebastião (SP) — apresentam risco alto ou muito

alto de elevação do nível do mar até 2030, com impactos previstos como paralisações operacionais, aumento de custos de manutenção e redução da capacidade devido à exposição a intempéries, destacando que Santos, o maior porto do país, enfrenta riscos significativos, embora sem risco estrutural alto, enquanto Aratu é o mais vulnerável a marés. (ANTAQ, 2021).

## SECAS PROLONGADAS E VENTOS FORTES

Secas prolongadas e ventos fortes causam a contração de solos argilosos pela perda de umidade, gerando recalques diferenciais nas fundações do corpo estradal, resultando em trincas, instabilidade e interrupção da navegação comercial, essencial para a logística continental.

Internacionalmente, a crise da Hidrovia Paraná-Paraguai, entre 2021 e 2022, devido a uma seca severa, reduziu o calado do rio Paraná a níveis críticos, forçando comboios de barcaças, que transportam soja e milho do Paraguai, Bolívia, Brasil e Argentina, a operar com cargas reduzidas em mais de 50%, elevando os custos de frete e causando perdas bilionárias ao agronegócio.

No Brasil, a seca histórica na Amazônia, em 2023, levou os rios Solimões, Negro e Madeira aos menores níveis em mais de um século, interrompendo a navegação de balsas que transportam combustível, alimentos e produtos industrializados para Manaus, impactando a Zona Franca de Manaus com uma crise logística sem precedentes e isolando centenas de comunidades ribeirinhas, que dependem exclusivamente do transporte fluvial e se viram sem acesso a alimentos, cuidados médicos e bens essenciais (Fernandes; Minori; Moraes Silva, 2025; Correa Filho, 2025).

## VENTOS FORTES

Ventos fortes, como os de furacões e tufões, geram cargas que podem superar os códigos de projeto de pontes de grandes vãos, torres de comunicação e sinalização, além de causar danos extensos em aeroportos e portos, paralisando regiões economicamente vitais. (BAND Paraná, 2025; O Globo, 2025).

O Furacão Harvey, em 2017, bloqueou rodovias e fechou portos no Texas por dias, demonstrando o impacto devastador de um único evento. (G1 Jornal Nacional, 2017). No Brasil, o porto de Rio Grande, segundo o mesmo estudo produzido pela ANTAQ, enfrenta impactos adicionais devido a ventos sul-sudoeste, que intensificam os danos à infraestrutura portuária. (ANTAQ,2021).

### DEGELO DO *PERMAFROST*

O degelo do *permafrost*, resultante do aquecimento global, provoca o descongelamento do solo, causando subsidência e instabilidade do terreno, que comprometem a integridade de infraestruturas de transporte como rodovias, ferrovias, aeroportos e oleodutos em regiões polares. Assim, aumentam custos de manutenção e riscos operacionais, enquanto a liberam metano, um potente gás de efeito estufa, e intensificam mudanças climáticas globais, criando um ciclo de retroalimentação que agrava eventos climáticos extremos.

Os impactos podem ser percebidos de forma distinta na geopolítica, ao ocasionar a abertura de novas rotas marítimas no Ártico, viabilizada pelo derretimento do gelo (Lynch *et al.*, 2022), reduzindo distâncias e custos logísticos entre mercados globais, alterando fluxos comerciais e impactando a competitividade no comércio mundial.

## 2.4 Tendências Futuras

Modelos climáticos, como os do Sexto Relatório (AR6) do IPCC, projetam um aumento na frequência e severidade de eventos extremos até e além de 2065, bem como a probabilidade de múltiplos eventos extremos simultâneos ou sequenciais, com cenários de emissões intermediárias e altas indicando riscos crescentes para infraestruturas de transporte. Essas projeções reforçam a necessidade de medidas preventivas e adaptativas. (IPCC, 2023).

## 3. VULNERABILIDADES SISTÊMICAS E RISCOS EM CASCATA

A análise de risco em infraestruturas de transporte deve ir além de componentes isolados, considerando a natureza complexa e interconectada desses sistemas, que podem desencadear consequências em cascata a partir de uma única falha. Para compreender a extensão desses impactos, é fundamental explorar as interdependências críticas entre diferentes setores, bem como os fatores de vulnerabilidade que amplificam os riscos, especialmente no contexto brasileiro, e os impactos socioeconômicos que se propagam, afetando desproporcionalmente populações vulneráveis e cadeias produtivas.

***Interdependências Críticas***: representam as ligações prioritárias que, se interrompidas, causam impactos sistêmicos graves, exigindo atenção especial em análises e estratégias de mitigação de riscos para proteger a resiliência do sistema global e evitar colapsos. Uma rodovia inundada não apenas interrompe o tráfego, como, também, dificulta o resgate de vítimas e o acesso de equipes de manutenção a uma subestação de energia danificada, o que pode suspender o fornecimento de energia elétrica para hospitais e sistemas de comunicação. Da mesma forma, a falha de um porto pode interromper a importação de combustível, paralisando a cadeia de transporte terrestre e a geração de energia. Modelar essas interdependências representa uma fronteira na pesquisa sobre resiliência. (Farias; Nascimento; Silva, 2022)

***Fatores de Vulnerabilidade Amplificados no Brasil***: os fatores configuram uma vulnerabilidade multidimensional, que demanda políticas integradas de proteção social, inclusão econômica e fortalecimento institucional. A vulnerabilidade resulta da combinação entre exposição, sensibilidade e capacidade adaptativa (De Abreu *et al.*, 2024). No Brasil, a alta proporção de rodovias não pavimentadas (78,5%) as torna extremamente suscetíveis a chuvas intensas. Além disso, o envelhecimento das estruturas e o uso histórico de materiais e códigos de projeto que não consideravam as condições climáticas atuais intensificam essa vulnerabilidade (Confederação Nacional do Transporte – CNT, 2024, s.p.; IPCC, 2007; IPCC, 2012).

***Impactos Socioeconômicos em Cascata***: referem-se a uma sequência de efeitos interligados que ocorrem após um evento adverso inicial, nos quais os impactos se propagam e amplificam ao longo de diferentes setores sociais e econômicos. As interrupções no transporte afetam desproporcionalmente as populações de baixa renda, que dependem do transporte público e, frequentemente, vivem em áreas de maior risco. A interrupção no escoamento de safras agrícolas, como observado no Rio Grande do Sul, gera impactos econômicos que se propagam por toda a cadeia de valor, influenciando preços e comprometendo a segurança alimentar. (GZH Digital, 2024)

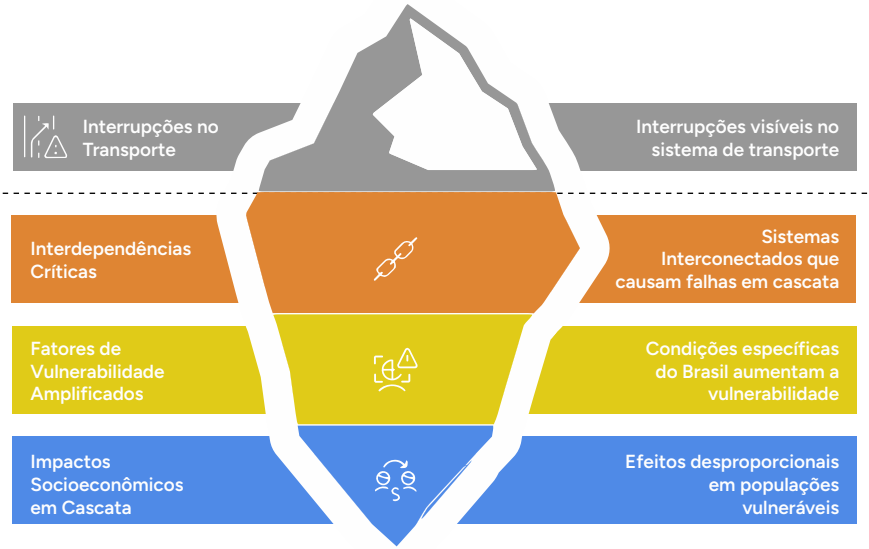



**Figura 01:** Interrupções no Transporte e Dependências.
*Fonte: Elaboração própria.*

## 4. ESTRATÉGIAS PARA CONSTRUÇÃO DE CAPACIDADE ADAPTATIVA

A construção de infraestruturas resilientes às mudanças climáticas exige uma abordagem integrada que transcenda os paradigmas tradicionais de engenharia, incorporando incertezas climáticas e interdependências sistêmicas no planejamento e na gestão.

Projetos convencionais, frequentemente baseados apenas em padrões históricos, não consideram a variabilidade climática atual e futura, o que compromete a durabilidade e a funcionalidade das infraestruturas.

A ausência de políticas públicas robustas e a limitada integração de projeções climáticas no planejamento agravam a vulnerabilidade de sistemas de transporte, principalmente a eventos extremos. Para enfrentar esses desafios, é essencial adotar estratégias multifacetadas que combinem uma governança adaptativa multinível, projeções climáticas, inovações tecnológicas, políticas regulatórias, mecanismos de financiamento, gestão proativa de riscos, bem como restauração e atualização do código de obras e normas para a construção de edificações e infraestruturas, promovendo a capacidade adaptativa necessária para garantir a continuidade operacional e a segurança socioeconômica.

## 4.1. Governança Adaptativa Multinível

A adaptação eficaz de sistemas de transporte depende de uma governança multinível que promova a coordenação entre os níveis federal, estadual, municipal, o setor privado — incluindo concessionárias e operadores logísticos — e a sociedade civil. Mecanismos de governança claros e estruturados são essenciais para alinhar objetivos, evitar conflitos de incentivos e garantir a implementação coerente de políticas de resiliência.

A criação de plataformas colaborativas, como comitês intersetoriais ou fóruns de diálogo, facilita a troca de informações, a definição de prioridades e a resposta coordenada a eventos climáticos extremos. Essa abordagem fortalece a capacidade institucional, promovendo uma gestão integrada que considera as especificidades regionais e as interdependências sistêmicas.

## 4.2. Incorporação de Projeções Climáticas no Planejamento

O planejamento de infraestruturas deve integrar, no primeiro momento, cenários climáticos de curto e médio prazo (2026–2065), para antecipar riscos e adaptar projetos às condições futuras. O

Programa *Brazil Pro-Roads*, financiado pelo Banco Mundial, exemplifica essa abordagem, ao incorporar avaliações de risco climático e estratégias de gestão de desastres no planejamento e na manutenção de rodovias (World Bank, 2024). Essas avaliações permitem identificar áreas vulneráveis e priorizar investimentos em adaptação, como reforço estrutural e reconfiguração de traçados viários, reduzindo impactos de eventos climáticos extremos.

## 4.3. Ciência de Dados, Tecnologia e Materiais Resilientes na Adaptação Climática

A integração de ciência de dados, tecnologias avançadas e materiais inovadores é essencial para fortalecer a resiliência de infraestruturas frente aos desafios das mudanças climáticas, transformando a adaptação em um processo proativo, eficiente e sustentável.

A ***Internet das Coisas* (IoT)** possibilita o monitoramento em tempo real, por meio de sensores de baixo custo instalados em pontes (medindo vibrações e tensões), ferrovias (monitorando temperaturas dos trilhos) e encostas (detectando umidade do solo), permitindo a identificação precoce de anomalias e prevenindo falhas catastróficas. O sensoriamento remoto, utilizando satélites e drones, oferece uma visão abrangente de redes de infraestrutura, identificando deformações e erosão, enquanto os dados coletados alimentam "gêmeos digitais" — modelos virtuais que simulam o comportamento de sistemas sob cenários climáticos, testando intervenções adaptativas antes de sua implementação.

A modelagem integrada clima-infraestrutura combina projeções climáticas de alta resolução com modelos de engenharia, prevendo vulnerabilidades em pontes ou rodovias e viabilizando manutenção preditiva e planejamento eficiente. Complementarmente, a adoção de materiais resilientes, como pavimentos permeáveis, asfalto reforçado e concreto de ultra-alto desempenho (UHPC) prolonga a durabilidade das infraestruturas, conforme destacado por de Abreu *et al.* (2022).

A combinação sinérgica dessas abordagens — monitoramento, sensoriamento, modelagem e materiais inovadores — permite respostas mais eficazes aos impactos climáticos, como simula-

ção do desempenho de pavimentos permeáveis em chuvas intensas ou implementação de barreiras naturais em áreas vulneráveis.

## 4.4. Políticas e Regulamentações para Infraestruturas Resilientes

A elaboração de normas específicas desempenha um papel central na promoção de infraestruturas adaptadas às mudanças climáticas. No Brasil, a Portaria nº 622/2024, emitida pelo Ministério dos Transportes (Brasil, 2024), determina que 1% da receita bruta de novos contratos de concessão seja destinado à promoção de infraestruturas resilientes e à mitigação de emissões de gases de efeito estufa. A regulamentação dessa medida está em desenvolvimento pela Agência Nacional de Transportes Terrestres (ANTT), conforme a Resolução ANTT nº 6.057/2024. (Agência Nacional de Transportes Terrestres, 2024).

Essas iniciativas estabelecem diretrizes claras para o setor, incentivando investimentos em soluções sustentáveis e alinhando o desenvolvimento de infraestruturas aos objetivos de adaptação climática. Apesar de sua relevância, a portaria apresenta limitações significativas, pois sua aplicação não abrange todos os setores de transporte, como portos e ferrovias, nem as rodovias sob gestão exclusivamente pública. Essa restrição reduz o impacto potencial da medida e evidencia a necessidade de políticas complementares.

## 4.5. Mecanismos de Financiamento Inovadores

O elevado custo da adaptação climática exige a diversificação das fontes de financiamento, para superar as limitações dos orçamentos públicos. Instrumentos financeiros inovadores desempenham um papel crucial na mobilização de recursos para projetos de infraestrutura resiliente. Títulos verdes (*green bonds*), que captam capital para iniciativas sustentáveis, bem como fundos climáticos internacionais, como aqueles geridos pelo Banco Mundial, oferecem alternativas viáveis para financiar a adaptação. As parcerias público-privadas (PPPs) com cláusulas específicas de resiliência incentivam o envolvimento do setor privado, promovendo o compartilhamento de riscos e benefícios.

Além disso, os seguros paramétricos representam uma solução eficaz para a recuperação pós-desastres, ao proporcionar pagamentos rápidos com base em indicadores predefinidos, como intensidade de chuvas ou ventos. Essa abordagem garante liquidez imediata para ações de reparo e mitigação, reduzindo os impactos econômicos de eventos extremos. A integração dessas ferramentas financeiras é indispensável para assegurar a viabilidade econômica das estratégias de adaptação, diminuindo a vulnerabilidade dos sistemas de transporte e promovendo sua sustentabilidade a longo prazo.

## 4.6. Gestão Proativa de Riscos

A gestão de riscos é um pilar essencial para minimizar interrupções causadas por eventos climáticos extremos. Planos de contingência, como rotas alternativas e protocolos de evacuação, são indispensáveis para manter a funcionalidade das infraestruturas em cenários adversos. No Rio Grande do Sul, por exemplo, protocolos de emergência que incluem a mobilização rápida de equipes de reparo têm se mostrado eficazes na redução de impactos (Governo de Estado do Rio Grande do Sul, 2024). Além disso, é importante a integração com sistemas de alerta climático, como os do Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais (Cemaden), que emitiu 3.620 alertas de desastres no ano de 2024, permitindo a antecipação de eventos extremos, possibilitando ações preventivas que reduzem danos e custos associados.

## 4.7. Framework Conceitual para Capacidade Adaptativa em Sistemas de Transporte

A capacidade adaptativa de sistemas de transporte frente às mudanças climáticas e eventos extremos depende de uma abordagem integrada que mobilize múltiplos “capitais” interdependentes. Esses capitais — físico, econômico, humano, social e institucional — formam a base para a construção de infraestruturas resilientes, capazes de antecipar, absorver e responder a impactos climáticos, garantindo a continuidade operacional e a sustentabilidade socioeconômica. A compreensão e o fortalecimento desses capitais são

essenciais para o desenvolvimento de estratégias que transcendam soluções técnicas isoladas, promovendo uma adaptação sistêmica e sustentável.

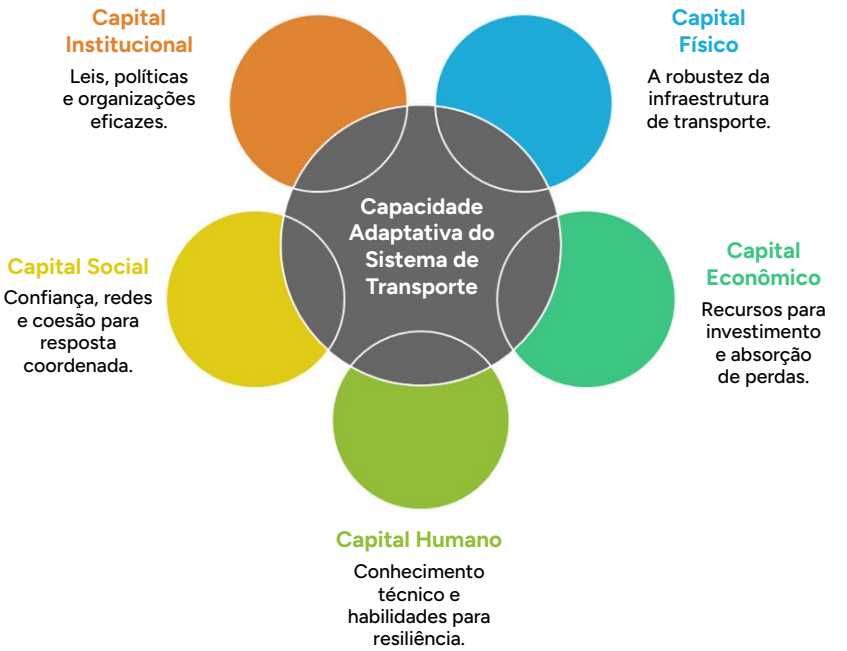



**Figura 02:** Capitais da Capacidade Adaptativa do Sistema de Transporte à Mudança do Clima. *Fonte: Elaboração própria.*

## 4.8. Portfólio de Medidas Adaptativas

O portfólio de medidas adaptativas é uma ferramenta essencial que orienta a tomada de decisão nos níveis estratégico, tático e operacional, promovendo a implementação de medidas eficazes por meio da combinação inteligente e contextualizada de soluções diversas, maximizando a resiliência ao aproveitar complementaridades e atender às especificidades de cada cenário. Esse portfólio pode ser estruturado em três grandes categorias: medida adaptativa cinza, ou *hard*; soluções baseadas na natureza; e medida

adaptativa *soft*. Cada uma dessas categorias oferece contribuições únicas para a adaptação, sendo sua aplicação mais eficaz quando planejada de forma integrada, considerando os objetivos de curto, médio e longo prazo.

## MEDIDAS ADAPTATIVAS CINZA OU "*HARD*"

As medidas adaptativas frequentemente denominadas "cinza" ou "*hard*" caracterizam-se por intervenções físicas robustas (obras de engenharia) projetadas para aumentar a resistência de infraestruturas às condições climáticas adversas. Exemplos incluem o alteamento do greide de rodovias e cotas de encabeçamento de pontes para mitigar os impactos de inundações, a construção de diques e barreiras contra o avanço do mar e o uso de materiais avançados, como asfalto modificado com polímeros, que suporta temperaturas extremas ou UHPC (Concreto de Ultra Desempenho), conhecido por sua alta resistência e durabilidade excepcional. No Brasil, iniciativas como o *Programa Brazil Pro-Roads* já incorporam algumas dessas práticas, demonstrando o potencial dessas soluções para proteger infraestruturas críticas. Embora eficazes, essas intervenções demandam investimentos significativos e devem ser cuidadosamente planejadas para evitar impactos ambientais negativos.

## SOLUÇÕES BASEADAS NA NATUREZA (SBN)

As *Soluções Baseadas na Natureza* utilizam ecossistemas naturais ou restaurados para aumentar a resiliência climática, ao mesmo tempo em que proporcionam benefícios adicionais à sociedade e ao meio ambiente. Exemplos incluem a restauração de manguezais para proteger zonas costeiras contra erosão e tempestades, a criação de planícies de inundação e parques alagáveis para gerenciar cheias urbanas e a adoção de pavimentos permeáveis para reduzir o escoamento superficial e minimizar inundações. Além de sua função adaptativa, essas soluções oferecem benefícios adicionais significativos, como o fortalecimento da biodiversidade, a criação de áreas de lazer e o sequestro de carbono, contribuindo para a sustentabilidade ambiental. Sua implementação, contudo,

requer planejamento de longo prazo e engajamento comunitário para garantir a manutenção e a eficácia contínua.

## MEDIDAS ADAPTATIVAS "*SOFT*"

As medidas adaptativas "*soft*" representam a base para a implementação bem-sucedida de qualquer estratégia adaptativa, embora sejam, muitas vezes, subestimadas. Essas soluções abrangem o desenvolvimento de políticas, normas e práticas que orientam a adaptação em diferentes escalas. Incluem a atualização de códigos de projeto e normas técnicas para incorporar riscos climáticos, a integração de projeções climáticas no planejamento do uso do solo, o fortalecimento de sistemas de alerta precoce — como os operados pelo Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais (Cemaden) no Brasil — e a elaboração de planos de contingência robustos.

A recente Lei nº 14.904/2024, que estabelece diretrizes para planos de adaptação climática no Brasil, marca um avanço significativo nesse campo, reforçando a importância de marcos regulatórios para coordenar esforços adaptativos. Essas medidas são cruciais para criar um ambiente habilitador, no qual soluções de engenharia e baseadas na natureza possam ser implementadas de forma eficaz (Brasil, 2024).

## A IMPORTÂNCIA DA INTEGRAÇÃO DE MEDIDAS ADAPTATIVAS

A verdadeira força do portfólio de medidas adaptativas reside na sua capacidade de combinar soluções cinza, verde e *soft* de maneira sinérgica. Por exemplo, a construção de um dique (solução cinza) pode ser complementada pela restauração de manguezais (solução verde) para aumentar a proteção costeira, enquanto normas técnicas atualizadas e sistemas de alerta precoce (soluções *soft*) garantem a sustentabilidade e a resposta rápida a eventos extremos. Essa abordagem integrada permite que as decisões sejam adaptadas às necessidades específicas de cada nível de ação: **estratégico**, para definir prioridades de longo prazo; **tático**, para

planejar intervenções de médio prazo; e **operacional**, para executar ações imediatas.

O *Projeto AdaptaVias*, no Brasil, identificou 58 medidas específicas (Ministério da Infraestrutura, 2021), como túneis de drenagem, gestão de planícies de inundação e barreiras naturais (vegetação para estabilização de encostas), que reforçam a resiliência a eventos climáticos extremos.

## 5. JUSTIÇA CLIMÁTICA COMO CAPACIDADE ADAPTATIVA NO SETOR DE TRANSPORTES

A justiça climática emerge como uma capacidade adaptativa essencial para o setor de transportes frente às mudanças climáticas, integrando princípios de equidade e sustentabilidade, delineados pelo *Plano Clima*[1] *brasileiro* (Ministério do Meio Ambiente e Mudança do Clima, 2025). Esse plano estabelece um caminho nacional para enfrentar os desafios climáticos, considerando as dimensões ambiental, social e econômica. Ao reconhecer a crise climática como uma questão ambiental, social e de direitos humanos, a justiça climática prioriza a reparação e a restituição de direitos às comunidades mais vulneráveis, que, embora contribuam menos para as emissões, sofrem desproporcionalmente seus impactos.

O *Plano Clima*, em fase de estruturação, propõe medidas de mitigação e adaptação para proteger infraestruturas críticas do setor de transportes, adotando uma perspectiva distributiva, procedimental e intergeracional (Ministério do Meio Ambiente e Mudança do Clima, 2025). Essa abordagem visa promover inclusão e reparação histórica, garantindo acesso equitativo a infraestruturas seguras e sustentáveis. Contudo, sua implementação enfrenta barreiras, incluindo a complexidade de coordenar esforços entre diferentes níveis governamentais, a resistência de setores econômicos ancorados em modelos tradicionais e pouco sustentáveis e a limitação de recursos financeiros para ações equitativas, especialmente em comunidades marginalizadas.

1 Plano Clima: É um instrumento previsto na Política Nacional sobre Mudança do Clima (PNMC), será o guia da política climática brasileira até 2035. (Ministério do Meio Ambiente e Mudança do Clima, 2025).

A incorporação de uma perspectiva intergeracional exige superar interesses políticos de curto prazo, enquanto a abordagem procedimental depende de uma participação social ampla, frequentemente restrita por desigualdades no acesso à informação e ao poder de decisão. Superar esses desafios é crucial para que a justiça climática se consolide como uma capacidade adaptativa robusta, capaz de orientar políticas de adaptação no setor de transportes.

Nesse contexto, a justiça climática como capacidade adaptativa manifesta-se em duas abordagens complementares no setor de transportes: incremental e transformacional, cada uma com características e impactos distintos.

A **adaptação incremental**, caracterizada por ajustes pontuais, como o reforço de pavimentos ou a elevação de diques, busca manter a funcionalidade dos sistemas existentes frente a estresses climáticos crescentes. Essa abordagem é de implementação imediata e financeiramente acessível, representando uma etapa inicial para proteger comunidades vulneráveis. Ao mitigar danos locais e preservar o acesso a infraestruturas essenciais, ela promove reparação, assegurando direitos frequentemente negados a populações marginalizadas. No entanto, suas soluções são paliativas, com impactos limitados a curto e médio prazo.

Por outro lado, a **adaptação transformacional** envolve mudanças estruturais profundas, necessárias quando os riscos climáticos atingem níveis existenciais. Exemplos incluem a realocação de rodovias costeiras para o interior ou a proibição de construções em áreas de alto risco. Essa abordagem reconfigura sistemas inteiros, promovendo uma reparação mais ampla ao redistribuir recursos e infraestruturas para áreas menos vulneráveis, garantindo acesso equitativo a transportes seguros e sustentáveis. Sua implementação, porém, requer decisões políticas complexas, consenso social e investimentos significativos.

Conforme O'Brien (2012) e Olson *et al.* (2014), a adaptação transformacional aborda as causas estruturais da vulnerabilidade, redirecionando sistemas para trajetórias sustentáveis a longo prazo. Autores como Adger e Jordan (2009), Feola (2015) e Wahid *et al.* (2017) destacam sua capacidade de criar novos estados e interações socioecológicas, promovendo resiliência e equidade.

Diferentemente da adaptação incremental, que oferece soluções paliativas, a adaptação transformacional representa uma reparação estrutural que alinha o desenvolvimento do setor de transportes a trajetórias justas e resilientes. Tanto as medidas incrementais quanto as transformacionais devem ser estabelecidas levando em conta uma avaliação das interdependências críticas, reconhecendo a complexa conexão entre os diferentes sistemas e fatores que influenciam a resiliência do setor.

A justiça climática, como capacidade adaptativa, orienta a escolha entre essas abordagens ou sua combinação, transformando o setor de transportes em um espaço de restituição de direitos e construção de um futuro equitativo.

## 6. ANÁLISE CUSTO-BENEFÍCIO DA ADAPTAÇÃO CLIMÁTICA NO SETOR DE TRANSPORTES

A construção de capacidades adaptativas para enfrentar as mudanças climáticas no setor de transportes exige uma análise econômica robusta, que contemple as incertezas inerentes ao futuro climático. A análise custo-benefício (ACB) é uma ferramenta essencial para priorizar investimentos em adaptação, equilibrando os custos iniciais com os benefícios de longo prazo, como a redução de despesas com reparos, a minimização de interrupções econômicas e a proteção de vidas. Evidências globais e nacionais baseadas no conceito sobre o Triplo Dividendo da Resiliência, do Inglês *Triple Dividend of Resilience* (TDR), reforçam que os retornos de adaptação superam significativamente os custos da inação, especialmente no setor de transportes.

### 6.1. Benefícios Econômicos e o Triplo Dividendo da Resiliência

Investimentos em adaptação no setor de transportes geram benefícios econômicos, sociais e ambientais, conforme destacado pelo Triplo Dividendo da Resiliência: o primeiro dividendo (evitar perdas) inclui a redução de danos a infraestruturas, como rodo-

vias e ferrovias, durante eventos climáticos extremos; o segundo dividendo (benefícios econômicos induzidos) abrange ganhos como maior eficiência logística e redução de custos operacionais; e o terceiro dividendo (benefícios sociais e ambientais) envolve melhorias na qualidade de vida e mitigação de emissões. Segundo o WRI, cada US$1 investido em adaptação pode gerar mais de US$10,50 em benefícios ao longo de 10 anos, com retornos médios de 27% em 320 projetos avaliados, incluindo o setor de transportes. (World Resources Institute, 2025).

## 6.2. Custos da Inação versus Custos da Ação

A inação frente às mudanças climáticas resulta em custos significativamente maiores do que os investimentos em adaptação. Entre janeiro de 2023 e outubro de 2024, o governo brasileiro alocou R$ 26 bilhões para manutenção de rodovias, um valor que pode crescer exponencialmente sem medidas adaptativas. O estudo do WRI (2025) destaca que a ausência de investimentos em adaptação amplia a vulnerabilidade de infraestruturas críticas, aumentando os custos de reparos e interrupções econômicas. No setor de transportes, os benefícios de adaptação, como a redução de perdas (primeiro dividendo), são particularmente altos devido ao impacto de interrupções em cadeias de suprimentos e mobilidade.

## 6.3. Metodologias Econômicas para a Tomada de Decisão no Setor de Transportes

A construção de capacidades adaptativas no setor de transportes frente às mudanças climáticas depende de metodologias econômicas robustas que orientem a tomada de decisão em um contexto de incertezas profundas. Três metodologias principais se destacam como pilares para a formulação de políticas resilientes: a Análise Custo-Benefício (ACB), a Análise de Opções Reais (AOR) e a Análise Multicritério (AMC).

A ACB é uma metodologia consolidada que compara os custos monetizados de um projeto com seus benefícios, expressos em termos financeiros, para determinar sua viabilidade econômica. No setor de transportes, a ACB é frequentemente utilizada para avaliar

investimentos em adaptação, como o reforço de pavimentos ou a elevação de pontes, que visam reduzir perdas causadas por eventos climáticos extremos (primeiro dividendo do TDR). Por exemplo, o *Programa Brazil Pro-Roads*, apoiado pelo Banco Mundial, demonstra que investimentos em manutenção preventiva de rodovias podem evitar bilhões em custos de reparos (World Bank, 2024).

No entanto, a ACB apresenta limitações significativas. Segundo o WRI (2025), apenas 31,5% dos benefícios de primeiro dividendo (evitar perdas) e 26% dos de segundo dividendo (benefícios econômicos induzidos, como maior eficiência logística) são monetizados nas avaliações de projetos de adaptação. Benefícios intangíveis, como equidade social ou resiliência comunitária, são frequentemente excluídos devido à dificuldade de quantificação. Além disso, a incerteza em cenários climáticos futuros compromete a precisão das projeções, subestimando os retornos reais dos investimentos. No Brasil, a escassez de dados locais agrava esse problema, dificultando a aplicação da ACB em análises específicas para o setor de transportes.

## ANÁLISE DE OPÇÕES REAIS (AOR)

A AOR oferece uma abordagem inovadora ao tratar investimentos em adaptação como "opções financeiras", valorizando a flexibilidade de implementar medidas em fases conforme novas informações climáticas se tornam disponíveis. Essa metodologia é particularmente adequada para o setor de transportes, onde infraestruturas modulares — como pontes resilientes ou sistemas de drenagem escaláveis — podem ser ajustadas ao longo do tempo, minimizando riscos e maximizando retornos. A AOR permite, por exemplo, iniciar um projeto com intervenções de baixo custo, como o reforço de uma rodovia, e adiá-las ou escalá-las com base em dados climáticos atualizados.

No contexto do TDR, a AOR facilita a captura dos três dividendos: evitar perdas (primeiro dividendo), promover ganhos econômicos (segundo dividendo) e gerar benefícios sociais e ambientais (terceiro dividendo). No Brasil, onde a complexidade geográfica

e climática exige soluções adaptativas, a AOR pode orientar investimentos em infraestruturas resilientes, como portos adaptados a inundações ou ferrovias melhor adaptadas a deslizamentos. Contudo, sua aplicação enfrenta barreiras, como a necessidade de modelos preditivos robustos e a capacitação técnica e legal para gerenciar projetos em múltiplas fases.

## ANÁLISE MULTICRITÉRIO (AMC)

A AMC é uma metodologia holística que avalia projetos com base em critérios econômicos, sociais e ambientais, sem exigir a monetização completa de todos os benefícios. Compatível com o TDR, a AMC permite incorporar benefícios intangíveis, como a resiliência comunitária — processo que vincula uma rede de capacidades adaptativas (recursos com atributos dinâmicos) da comunidade a uma trajetória positiva de funcionalidade e adaptação após uma perturbação ou adversidade (Oliveira; Morais, 2018) e a redução de emissões, que são cruciais para o setor de transportes. Por exemplo, a adaptação de rodovias vicinais no Brasil não apenas reduz custos operacionais, mas também melhora o acesso a transportes para comunidades marginalizadas, promovendo equidade social (terceiro dividendo).

A AMC é especialmente valiosa em contextos de incerteza, pois permite ponderar múltiplos objetivos sem depender exclusivamente de projeções climáticas precisas. No setor de transportes, ela pode ser usada para avaliar projetos como a realocação de rodovias costeiras, considerando impactos econômicos (custos de construção), sociais (acesso a serviços) e ambientais (fortalecimento da biodiversidade).

No Brasil, a escassez de dados locais e a falta de padronização dificultam a aplicação dessas metodologias econômicas, mas sua customização às necessidades específicas do setor de transportes — como a resiliência de cadeias logísticas — é fundamental para maximizar os três dividendos do framework TDR (evitar perdas, benefícios econômicos e ganhos socioambientais), de forma a ampliar a capacidade de tomada de decisão assertiva.

## 7. CONCLUSÃO

A construção de capacidades adaptativas no setor de transportes frente às mudanças climáticas exige uma abordagem integrada que combine metodologias econômicas robustas, como a Análise Custo-Benefício (ACB), que compara os custos e benefícios de um projeto ou ação para determinar se os benefícios superam os custos; a Análise de Opções Reais (AOR), que avalia projetos de investimento levando em consideração a flexibilidade e incerteza inerentes a eles; e a Análise Multicritério (AMC), que pode ser aplicada a diversas áreas, e auxilia na escolha em diversas alternativas, com estratégias que incorporem governança multinível, projeções climáticas, inovações tecnológicas, políticas regulatórias, financiamento inovador e gestão proativa de riscos.

No Brasil, onde eventos climáticos extremos, como as inundações que ocorreram no Rio Grande do Sul e as secas na Amazônia, expõem a vulnerabilidade das infraestruturas de transporte. A customização dessas metodologias às demandas específicas do setor — como a resiliência de cadeias logísticas e a equidade no acesso a transportes — é essencial para maximizar os três dividendos do framework TDR: evitar perdas, promover benefícios econômicos e garantir ganhos socioambientais. Essa integração, alinhada aos princípios de justiça climática e ao Plano Clima brasileiro, pode contribuir para transformar o setor de transportes em um vetor de desenvolvimento sustentável, equitativo e resiliente, capaz de enfrentar as incertezas de um futuro climático desafiador.

## REFERÊNCIAS


ABREU, V. H. S., SANTOS, A. S., & MONTEIRO, T. G. M. **Climate Change Impacts on the Road Transport Infrastructure**: A Systematic Review on Adaptation Measures. Sustainability, v.14, n. 14, p. 8864, 2022. https://doi.org/10.3390/su14148864

ADAPTABRASIL MCTI. (2025). Disponível em: https://adaptabrasil.mcti.gov.br/detalhes-ferrovias. Acesso em: 23 set. 2025.

AGÊNCIA NACIONAL DE TRANSPORTES TERRESTRES (ANTT). **Resolução nº 6.057, de 28 de novembro de 2024**.

Disponível em: https://anttlegis.antt.gov.br/action/ActionDatalegis.php?acao=abrirTextoAto&tipo=RES&numeroAto=00006057&seqAto=000&valorAno=2024&orgao=DG/ANTT/MT&cod_modulo=623&cod_menu=9230. Acesso em: 4 nov. 2025.

BAND PARANÁ. **Tornado no Paraná expõe efeitos do desmatamento e da crise climática**. Disponível em: https://www.band.com.br/band-parana/noticias/tornado-no-parana-expoe-efeitos-do-desmatamento-e-da-crise-climatica-202511141703. Acesso em: 25 nov. 2025.

BBC NEWS BRASIL. **Enchentes na Alemanha e na Bélgica**: As impressionantes imagens das inundações que deixaram dezenas de mortos. BBC News Brasil, 16 jul. 2021. Disponível em: https://www.bbc.com/portuguese/internacional-57861622. Acesso em: 26 set. 2025.

BELL, M. L., Gasparrini, A., & BENJAMIN, G. C. Climate change, extreme heat, and health. **New England Journal of Medicine**, v. 390, n.19, p. 1793-1801, 2024.

BRASIL. **Lei nº 14.904, de 27 de junho de 2024**. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2023-2026/2024/Lei/L14904.htm. Acesso em: 6 nov. 2025.

BRASIL. Ministério dos Transportes – MT. **Plano Clima**. Institucional. Brasília, DF: Ministério dos Transportes, 2024. Disponível em: https://www.gov.br/mma/pt-br/composicao/smc/plano-clima/psm-transportes-documento-na-integra.pdf. Acesso em: 22 set. 2025.

BRASIL. Ministério dos Transportes – MT. **Projeto Adaptavias**. Institucional. Brasília, DF: Ministério dos Transportes, 2021. Disponível em: https://www.gov.br/transportes/pt-br/assuntos/sustentabilidade/projeto-adaptavias. Acesso em: 22 set. 2025.

CÂMARA DOS DEPUTADOS. **Câmara aprova diretrizes para elaboração de planos de adaptação às mudanças climáticas**. 2024. https://www.camara.leg.br/noticias/1068779-camara-aprova-diretrizes-para-elaboracao-de-planos-de-adaptacao-as-mudancas-climaticas/

CARGAS E TRANSPORTES. (2025). Transporte e o clima. https://cargasetransportes.com.br/2025/01/24/transporte-e-o-clima-2/de

CEPED UFSC; WORLD BANK. **Relatório de danos materiais e prejuízos decorrentes de desastres naturais no Brasil**: 1995 - 2014. Universidade Federal de Santa Catarina, 2016. Disponível em: http://www.ceped.ufsc.br/wp-content/uploads/2017/01/111703-WP-CEPEDRelatoriosdeDanoslayout-PUBLIC-PORTUGUESE-ABSTRACT-SENT.pdf. Acesso em: 4 nov. 2025.

CNT. **Transporte Rodoviário: Impactos da Qualidade do Asfalto Sobre o Transporte Rodoviário.** – Brasília: CNT, 2019. Disponível em: https://cdn.cnt.org.br/diretorioVirtualPrd/5fc9d21e-0498-4df0-8973-acba587ee907.pdf. Acesso em: 26 set. 2025.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE – CNT; Serviço Social do Transporte - SEST; Serviço Nacional de Aprendizagem do Transporte – SENAT; Instituto de Transporte e Logística – ITL. **Pesquisa CNT de Rodovia 2024**. Brasília-DF, 2024. Disponível em https://static.poder360.com.br/2024/11/Pesquisa-CNT-de-Rodovias-2024.pdf. Acesso em: 22 set. 2025.

CORREA FILHO, G. C. **Os impactos da estiagem no estado do Amazonas na produção do Polo Industrial, no período de 2022 a 2024**. 2025. Disponível em: https://riu.ufam.edu.br/handle/prefix/9004. Acesso em: 20 out. 2025.

DE ABREU, V. H. S., DOS SANTOS, R. F., ODA, S., & SANTOS, A. S. **Análise de riscos climáticos em infraestruturas de transportes:** uma exploração metodológica. Boletim do Observatório Ambiental Alberto Ribeiro Lamego, v.18, n. 1, p. 28-44,2024.

EL PAÍS BRASIL. **Temporais Causam Inundações na Alemanha, que deixam Dezenas de Mortos e Desaparecidos**. EL PAÍS Brasil, 15 jul. 2021. Disponível em: https://brasil.elpais.com/internacional/2021-07-15/inundacoes-na-alemanha-deixam-dezenas-de-mortos-e-desaparecidos.html. Acesso em: 26 set. 2025.

EXAME. **A infraestrutura de transportes e os desafios impostos pelas mudanças climáticas**. 2025. https://exame.com/bussola/a-infraestrutura-de-transportes-e-os-desafios-impostos-pelas-mudancas-climaticas/

FARIAS, ANDRÉ CORREIA DE; NASCIMENTO, JOÃO PAULO DE; SILVA, ELISA DE ANDRADE. **Avaliação quantitativa do impacto das inundações no funcionamento da infraestrutura crítica de transporte. Ambiente Construído, v. 22, n. 4, p. 159-175**, 2022. Disponível em: https://www.scielo.br/j/ac/a/k5Jxhjp6L7pxX8tMXZrd7dp/?format=html&lang=pt. Acesso em: 26 nov. 2025.

FERNANDES, A. F.; MINORI, A. M.; MORAES SILVA, J. G. de. **A crise climática e seus impactos socioeconômicos e ambiental na Amazônia.** Aracê, v. 7, n. 4, p. 18188-18209, 2025. Disponível em: https://periodicos.newsciencepubl.com/arace/article/view/4423. Acesso em: 20 out. 2025.

FGV EAESP. (2024). Cost-benefit analysis (ACB) of climate change adaptation measures in the Brazilian semiarid region. https://eaesp.fgv.br/en/study-centers/center-sustainability-studies/projects/cost-benefit-analysis-acb-climate-change-adaptation-measures-brazilian-semiarid-region

G1 JORNAL NACIONAL. **Furacão Harvey perde força, mas provoca transtornos nos EUA**. https://g1.globo.com/jornal-nacional/noticia/2017/08/furacao-harvey-perde-forca-mas-provoca-transtornos-nos-eua.html. Acesso em: 25 nov. 2025.

GZH DIGITAL. **Avaliação dos efeitos e impactos das inundações no Rio Grande do Sul.** Nov 2024. https://issuu.com/gauchazh/docs/avalia_o_dos_efeitos_e_impactos_das_inunda_es_no. Acesso em: 25 nov. 2025.

IPCC – INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. Climate Change 2007. Synthesis Report. **Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the IPCC. Geneva:** IPCC, 2007. 104 p.

IPCC – INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **Managing the risks of extreme events and disasters to**

**advance climate change adaptation:** a special report of Working Groups I and II of the IPCC. Cambridge: Cambridge University Press, 2012. 582 p.

JARAMILLO, P. *et al*. Transport. **In Climate Change 2022**: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, 2022.

JOSHI, K., KHAN, A., ANAND, P., & SEN, J. **Understanding the synergy between heat waves and the built environment:** a three-decade systematic review informing policies for mitigating urban heat island in cities. Sustainable Earth Reviews, v.7, n.1, p. 25, 2024.

LEE, J.-Y. *et al*. **Future Global Climate**: Scenario-Based Projections and Near-Term Information. In Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Cambridge University Press, pp. 553–672, 2021.

LI, L., DING, T., GAO, H., & KE, Z. **Entire-Basin Heat Wave in the Yangtze River Is Becoming the New Normal. Journal of Applied Meteorology and Climatology**, v. 64, n. 7, p.761-775, 2025.

LYNCH, A. H., NORCHI, C. H., & LI, X. **The interaction of ice and law in Arctic marine accessibility. Proceedings of the National Academy of Sciences,** v.119, n.26, e2202720119, 2022.

MCGREGOR, G. Observed Impacts of Heatwaves. In Heatwaves: Causes, Consequences and Responses (pp. 435-489). Cham: Springer International Publishing, 2024.

MINISTÉRIO DA INFRAESTRUTURA (BRASIL). **Levantamento de impactos e riscos climáticos sobre a infraestrutura federal de transportes terrestres (rodoviário e ferroviário)** ... Rio de Janeiro: Associação GITEC/COPPE, 2021. 64 p. Disponível em: https://www.gov.br/transportes/pt-br/assuntos/sustentabilidade/produto2.pdf. Acesso em: 21 out. 2025.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. (2025). **AdaptaClima**. http://adaptaclima.mma.gov.br/infraestrutura-de-transportes-e-mobilidade-no-contexto-da-mudanca-do-clima.

MINISTÉRIO DOS TRANSPORTES. **Estudo inédito analisa impacto da mudança climática em rodovias e ferrovias no Brasil**. 2023. https://www.gov.br/transportes/pt-br/assuntos/noticias/2023/10/estudo-inedito-analisa-impacto-da-mudanca-climatica-em-rodovias-e-ferrovias-no-brasil.

ND MAIS. **Impacto das mudanças climáticas na logística e no transporte de cargas**. 2024. https://ndmais.com.br/meio-ambiente/impacto-das-mudancas-climaticas-na-logistica-e-no-transporte-de-cargas/.

NTC&Logística. **Impacto das mudanças climáticas na logística e no transporte de cargas**. 2024. Disponível em: https://www.portalntc.org.br/impacto-das-mudancas-climaticas-na-logistica-e-no-transporte-de-cargas/. Acesso em: 23 set. 2025.

O GLOBO. **Prejuízos em Rio Bonito do Iguaçu passam de R$ 114 milhões após tornado no Paraná.** Disponível em: https://oglobo.globo.com/politica/noticia/2025/11/10/prejuizos-em-rio-bonito-do-iguacu-passam-de-r-114-milhoes-apos-tornado-no-parana.ghtml. Acesso em: 25 nov. 2025.

OLIVEIRA, ANA TERCILA CAMPOS; MORAIS, NORMANDA ARAUJO DE. **Resiliência comunitária: um estudo de revisão integrativa da literatura.** Temas psicol., Ribeirão Preto, v. 26, n. 4, p. 1371-1382, out./dez. 2018. Disponível em: https://pepsic.bvsalud.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1413-389X2018000400002. Acesso em: 4 nov. 2025.

PREVENTIONWEB. **Brazil needs a new approach to climate Mobility**, 2024. Disponível em: https://www.preventionweb.net/news/brazil-needs-new-approach-climate-mobility.

RAHIMITOURANPOSHTI, M., SHARMA, B., CAMUR, M. C., OMITAOMU, O. A., & LI, X. **Investigating Resiliency of Transportation Network Under Targeted and Potential Climate Change Disruptions**. arXiv preprint arXiv:2506.19102,2025.

SCIENCEDIRECT. **Planned expansion of transportation infrastructure in Brazil has implications for the pattern of agricultural production and carbon emissions**, 2024. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969724025804.

UKKUSURI, S. V., PARK, S. U., MITTAL, S., CHAPMAN, L., MANOLI, G., Santos, A., ... & ROMERO, N. We need to prepare our transport systems for heatwaves—here's how. **Nature**, v. 632, n. 8024, p. 253-256, 2024.

VALOR ECONÔMICO. **Adaptação urgente**: mudanças climáticas desafiam infraestrutura no Brasil, 2024. https://valor.globo.com/publicacoes/especiais/revista-infraestrutura-e-logistica/noticia/2024/11/14/adaptacao-urgente-mudancas-climaticas-desafiam-infraestrutura-no-brasil.ghtml.

VALOR ECONÔMICO. **Veja como o calor está mudando as rodovias brasileiras.** Valor Econômico, 6 jun. 2025. Disponível em: https://valor.globo.com/brasil/noticia/2025/06/06/veja-como-o-calor-esta-mudando-as-rodovias-brasileiras.ghtml. Acesso em: 26 set. 2025.

WORLD BANK. **Brazil**: Equitable, Competitive and Sustainable. Washington, DC: World Bank, 2017. Disponível em: https://www.ceped.ufsc.br/wp-content/uploads/2017/01/111703-WP-CEPEDRelatoriosdeDanoslayout-PUBLIC-PORTUGUESE-ABSTRACT-SENT.pdf. Acesso em: 5 nov. 2025.

WORLD RESOURCES INSTITUTE (WRI). **Strengthening the Investment Case for Climate Adaptation**: A Triple Dividend Approach. Disponível em: https://www.wri.org/research/climate-adaptation-investment-case. Acesso em: 26 nov. 2025.

WRI Brasil. **5 mudanças para transformar o transporte e cumprir as metas climáticas,** 2023**.** Disponível em : https://www.wribrasil.org.br/noticias/5-mudancas-para-transformar-os-sistemas-de-transporte-e-cumprir-metas-climaticas. Acesso em: 21 out. 2025.

10

# *BUILDING ADAPTIVE CAPACITIES FOR THE TRANSPORT SECTOR IN AN UNCERTAIN CLIMATE FUTURE*

**GEORGE YUN, ANDREA SANTOS E JEANCARLO ALBERTO DOS REIS**

## *SUMMARY*

This chapter examines the impacts of climate change on transportation infrastructures in Brazil, focusing on three main analytical areas: (1) physical failure mechanisms caused by extreme events, such as heat waves, heavy rainfall, sea-level rise, prolonged droughts, and strong winds; (2) systemic vulnerabilities and cascading risks, considering critical interdependencies between sectors and factors amplified in the Brazilian context, such as aging infrastructure and socioeconomic inequalities; and (3) strategies for building transformational adaptive capacity, including multilevel governance, incorporation of climate projections, innovations in data science, technologies (IoT, remote sensing), and resilient materials, regulatory policies, innovative financing, and proactive risk management. Based on a critical review of the literature and analysis of recent cases, such as the droughts in the Amazônia and the floods in Rio Grande do Sul, it is argued that adaptation must integrate climate justice, with incremental and transformational approaches, as well as robust economic methodologies to maximize the Triple Dividend of Resilience. It is concluded that lasting resilience requires integrated policies that transcend traditional paradigms, promoting social equity, sustainability, and the reduction of economic losses in an uncertain climate future.

DOI: 10.66949/q5h8b1m7

**Keywords**

Critical Infrastructure, Adaptive Capacity, Climate Justice, Climate Resilience.

## 1. INTRODUCTION

Climate change poses a critical challenge for the 21st century, profoundly impacting transportation infrastructures, which serves as the backbone of the global economy and social connectivity—understood as the integration of social and economic relationships supported by transportation infrastructure, and is therefore essential for social cohesion and economic functioning in the face of the impacts of climate change.

In Brazil, where transportation is vital for economic development and regional integration, these infrastructures system face increasing vulnerabilities due to extreme weather events, such as the 2024 floods in Rio Grande do Sul, which damaged bridges, highways, and Salgado Filho International Airport, and historic droughts in Amazônia, which disrupted river navigation, essential for riverside communities.

Between 1995 and 2014, the country incurred losses of R$ 26.9 billion due to climate-related damage to infrastructure, highlighting the urgency of adaptive measures (World Bank, 2017).

This chapter goes beyond simply identifying impacts and solutions, proposing an integrated analysis of the physical mechanisms of failure, systemic vulnerabilities, and the strategies necessary to build transformational adaptive capacity.

The magnitude and uncertainty of climate change only reinforce the fact that existing infrastructures are insufficient; therefore, it is crucial to rethink the planning, design, governance, and financing of transportation systems to ensure lasting resilience, social equity, and sustainability amid an uncertain climate future.

## 2. CLIMATE CHANGE AND ITS EFFECTS ON TRANSPORTATION INFRASTRUCTURE

Climate change poses a growing threat to transportation infrastructure, affecting highways, railways, ports, and waterways through complex physical mechanisms such as heat waves, heavy rainfall, sea-level rise, prolonged droughts, strong winds, and permafrost thaw. These phenomena cause significant damage, such as deformations of asphalt pavements, buckling of rails, bridge collapse, coastal flooding, and disruptions to river navigation, compromising the functionality of systems essential to the economy and social connectivity. (Jaramillo *et al.*, 2022; de Abreu, *et al.*, 2022; AdaptaVias, 2023; Ukkusuri *et al.*, 2024).

### 2.1 Converging Effects Between Heat Waves and High Temperatures

Rising temperatures and heat waves have a severe impact on road and rail infrastructure. On highways, extreme heat reduces the viscosity and stiffness of the asphalt binder, a viscoelastic material that is susceptible to temperatures above its softening point (50°C to 80°C, which can be reached on the pavement surface under intense sunlight). This reduction cause permanent deformations such as wheel rutting, binder bleeding, and accelerated asphalt oxidation, making it more brittle and prone to fatigue cracking. (Joshi; Khan; Anand; Sen, 2024, p. 25; Bell; Gasparrini; Benjamin, 2024).

Regarding railways, steel rails—which are highly susceptible to thermal expansion—can suffer track *buckling* due to compressive stress exceeding the lateral resistance of the ballast if there are no adequate expansion joints or robust fastenings, posing a serious risk of derailments. (McGregor, 2024; Rahimitouranposhti *et al.*, 2025).

Heat waves in Europe in 2019 damaged asphalt pavements on highways in Germany and France, causing cracks and deformations, and led to speed restrictions on railways in the United

Kingdom due to the risk of rail buckling (Ukkusuri *et al.*, 2024, p. 253-256.; Li; Ding; Gao; Ke, 2025, p. 761-775; G1, 2023).

In Brazil, high temperatures in the Midwest, particularly in states such as Mato Grosso and Goiás, are accelerating the deterioration of highways like BR-163—which is essential for grain transport—causing deformatios due to rutting and bleeding, while railways, such as the North-South Railway, face the risk of buckling on stretches exposed to extreme heat, compromising export logistics. (Ministério Dda Infraestrutura, 2021).

## 2.2 Converging Effects of Heat Waves and Wildfires

Persistent extreme temperatures in Central Brazil, combined with drought conditions that make biomass highly flammable, create conditions conducive to large-scale wildfires, such as those in the Pantanal and the Amazônia. These fires destroy wooden bridges on local roads, damage asphalt pavements, and cause prolonged closures of major highways due to low visibility caused by dense smoke, posing an acute risk to road and air safety, with the negative synergy between drought, heat, and fire promoting destruction and disruption of transportation. (Valor Econômico, 2025; CNT, 2019).

## 2.3. Top climate threats to transport infrastructure

### HEAVY PRECIPITATION:

Heavy rainfall, which exceeds the infiltration capacity of the soil and urban drainage systems, causes accelerated surface runoff, intensifying erosion and undermining the foundations of bridges, overpasses, and the subgrade of highways and railways. In mountainous areas, soil saturation reduces cohesion between particles, decreasing the angle of internal friction and triggering landslides, which destroy entire stretches of infrastructure.

Disasters related to heavy rainfall on the international stage include the 2021 floods in Germany and Belgium, which destroyed dozens of bridges and more than 600 km of railway lines (BBC News

Brasil, 2021; El País, 2021), highlighting the vulnerability of infrastructure in developed countries to extreme rainfall. The Coastal El Niño phenomenon in Peru, where torrential rains generate violent flows of water, mud, rocks and other debris that rapidly descend steep slopes during intense, short-luration rains (*huaycos*), cut off the Carretera Central, paralyzing the transport of essential minerals such as copper and zinc.

In Brazil, the floods in Rio Grande do Sul in September 2023 and April 2024—particularly the 2024 event—caused simultaneous flooding of rivers in the Guaíba basin. As a result, crucial bridges collapsed, such as the one on BR-116; Salgado Filho International Airport was flooded; air transport was halted; hundreds of highways sections were blocked by water, landslides, or road damage; dozens of municipalities were cut off; and the transportation of agricultural products—such as soybeans and corn, which are vital to the economy—was disrupted.

## SEA LEVEL RISE

Chronic sea-level rise and severe storm surges threaten coastal infrastructure—such as ports, coastal roads, and airports, with flooding—permanent or frequent—and saltwater intrusion, which corrodes the reinforcing steel in concrete and damages metal components.

In the international context, Jakarta, Indonesia, is facing a crisis aggravated by rising sea levels and land subsidence, which are making its transportation infrastructure vulnerable and requiring plans to relocate the capital.

In Brazil, a 2021 study by the National Waterway Transport Agency (Agência Nacional de Transportes Aquaviários – ANTAQ), in partnership with GIZ, identified that 11 of the 21 coastal public ports analyzed—Aratu (BA), Paranaguá (PR), Rio Grande (RS), Santos (SP), São Francisco do Sul (SC), Cabedelo (PB), Fortaleza (CE), Imbituba (SC), Itaguaí (RJ), Recife (PE) and São Sebastião (SP)—face a high or very high risk of sea-level rise by 2030, with anticipated impacts such as operational shutdowns, increased maintenance costs, and

reduced capacity due to exposure to svere weather. The study highlights that Santos, the country's largest port, faces significant risks, though without a high structural risk, while Aratu is the most vulnerable to tides. (ANTAQ, 2021).

## PROLONGED DROUGHTS AND STRONG WINDS

Prolonged droughts and strong winds cause clay soils to contract due to moisture loss, leading to differential settlement in the roadbed foundations, which results in cracks, instability, and disruptions to commercial shipping—a vital component of continental logistics.

Internationally, the crisis on the the Paraná-Paraguay Waterway between 2021 and 2022, caused by a severe drought, reduced the water level of the Paraná River to critical levels, forcing barges convoys—which transport soybeans and corn from Paraguay, Bolivia, Brazil, and Argentina—to operate with loads reduced by more than 50%, raising freight costs and causing billions in losses to the agribusiness sector.

In Brazil, the historic drought in the Amazônia in 2023 caused the Solimões, Negro, and Madeira rivers to drop to the their lowest levels in over a century, halting ferry service that transports fuel, food, and industrial goods to Manaus, impacting the Manaus Free Trade Zone with an unprecedented logistics crisis and isolating hundreds of riverside communities, which depend exclusively on river transport and found themselves without access to food, medical care, and essential goods (Fernandes; Minori; Moraes Silva, 2025; Correa Filho, 2025).

## STRONG WINDS

Strong winds, such as those from hurricanes and typhoons, generate forces that can exceed the design codes for large-span bridges, communication and signals towers, and cause extensive damage to airports and ports, paralyzing economically vital regions. (BAND Paraná, 2025; O Globo, 2025).

Hurricane Harvey, in 2017, blocked highways and closed ports in Texas for days, demonstrating the devastating impact of a single event. (G1 Jornal Nacional, 2017).

In Brazil, the port of Rio Grande, according to the same study produced by ANTAQ, faces additional impacts due to south--southwesterly winds, which intensify damage to port infrastructure. (ANTAQ, 2021).

### PERMAFROST THAW

The thawing of permafrost, resulting from global warming, causes the ground to thaw, leading to subsidence and ground instability, which compromises the integrity of transportation infrastructures such as highways, railways, airports, and oil pipelines in polar regions. Consequently, maintenance costs and operational risks increase, while methane—a potent greenhouse gas—is released, intensifies global climate change and creating a feedback loop that exacerbates extreme weather events.

The impacts can be seen most clearly in geopolitics, as they lead to the opening of new maritime routes in the Arctic—made possible by the melting of the ice (Lynch *et al.*, 2022)—thereby reducing distances and logistical costs between global markets, altering trade flows, and affecting competitiveness in world trade.

## 2.4 Future Trends

Climate models, such as those in the IPCC's Sixth Assessment Report (AR6), project an increase in the frequency and severity of extreme events through 2065 and beyoind, as well as the likelihood of multiple simultaneous or sequential extreme events, with medium- and high-emissions scenarios indicating growing risks to transportation infrastructure. These projections underscore the need for preventive and adaptive measures. (IPCC, 2023).

## 3. SYSTEMIC VULNERABILITIES AND CASCADING RISKS

Risk analysis in transportation infrastructure must go beyond isolated components, taking into account the complex and interconnected nature of these systems, which can trigger cascading consequences from a single failure. To understand the extent of these impacts, it is essential to explore the critical interdependencies between different sectors, as well as the vulnerability factors that amplify risks—especially in the Brazilian context—and the socioeconomic impacts that ripple out, disproportionately affecting vulnerable populations and supply chains.

***Critical Interdependencies***: these represent the priority connections that, if disrupted, cause severe systemic impacts, requiring special attention in risk analysis and mitigation strategies to protect the resilience of the global system and prevent collapses. A flooded highway not only disrupts traffic but also hinders the rescue of victims and maintenance team's access to access a damaged power substation, which can cut off the power supply to hospitals and communication systems. Similarly, the failure of a port can interrupt fuel imports, paralyzing the land transport chain and power generation. Modeling these interdependencies represents a frontier in resilience research. (Farias; Nascimento; Silva, 2022)

*Amplified Vulnerability Factors in Brazil*: these factors constitute a multidimensional vulnerability that requires integrated policies for social protection, economic inclusion, and institutional strengthening. Vulnerability results from the combination of exposure, sensitivity, and adaptive capacity (de Abreu *et al.*, 2024). In Brazil, the high proportion of unpaved highways (78.5%) makes them extremely susceptible to heavy rains. In addition, the aging of infrastructure and the historical use of materials and design codes that did not consider current climatic conditions intensify this vulnerability (CNT, 2024, s.p.; IPCC, 2007; IPCC, 2012).

***Cascading Socioeconomic Impacts***: these refer to a sequence of interconnected effects that occur following an initial adverse

event, in which the impacts propagate and amplify across different social and economic sectors. Disruptions in transportation disproportionately affect low-income populations, who rely on public transportation and often live in high-risk areas. Disruptions in the distribution of agricultural crops, as observed in Rio Grande do Sul, generate economic impacts that propagate throughout the entire value chain, influencing prices and compromising food security. (GZH Digital, 2024)

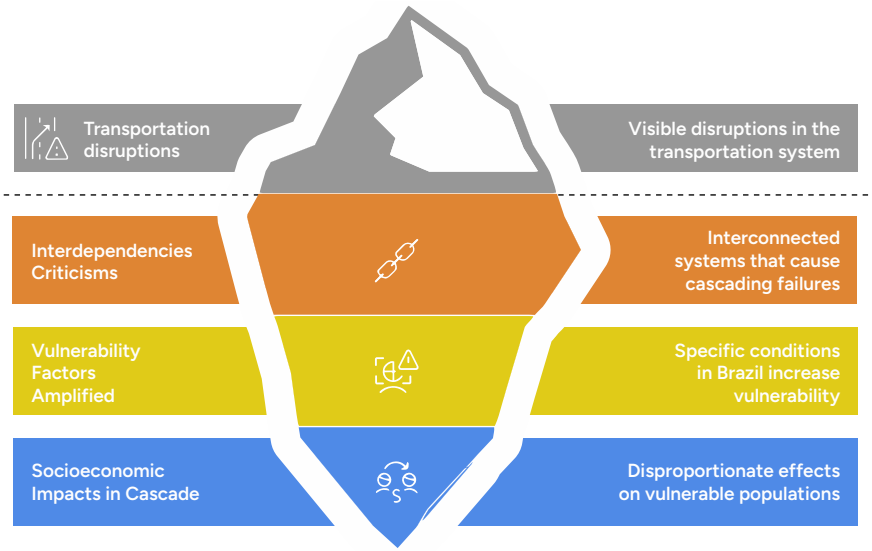



**Figure 01:** Transportation Disruptions and Dependencies.
*Source: Prepared by the authors.*

## 4. STRATEGIES FOR BUILDING ADAPTIVE CAPACITY

Building climate-resilient infrastructure requires an integrated approach that transcends traditional engineering paradigms, incorporating climate uncertainties and systemic interdependencies into planning and management. Conventional projects, which

are often based only on historical patterns, do not consider current and future climate variability, thereby compromising the durability and functionality of infrastructure.

The lack of robust public policies and the limited integration of climate projections into planning exacerbate the vulnerability of transportation systems, particularly to extreme events. To address these challenges, it is essential to adopt multifaceted strategies that combine multilevel adaptive governance, climate projections, technological innovations, regulatory policies, financing mechanisms, and proactive risk management, as well as the restoration and updating of building codes and standards for the construction of buildings and infrastructure, thus promoting the adaptive capacity necessary to ensure operational continuity and socioeconomic security.

## 4.1. Multilevel Adaptive Governance

The effective adaptation of transportation systems depends on multilevel governance that promotes coordination among federal, state, and municipal governments, the private sector—including concessionaires and logistics operators—and civil society. Clear and structured governance mechanisms are essential for aligning objectives, avoiding conflicts of interest, and ensuring the consistent implementation of resilience policies.

The creation of collaborative platforms, such as cross-sector committees or dialogue forums, facilitates the exchange of information, the definition of priorities and the coordinated response to extreme weather events. This approach strengthens institutional capacity by promoting integrated management that take into account regional specificities and systemic interdependencies.

## 4.2. Incorporating Climate Projections into Planning

Infrastructure planning must first incorporate short- and medium-term climate scenarios (2026–2065) to anticipate risks and adapt projects to future conditions. The Brazil Pro-Roads Program, funded by the World Bank, exemplifies this approach by

incorporating climate risk assessments and disaster management strategies into highway planning and maintenance (World Bank, 2024). These assessments make it possible to identify vulnerable areas and prioritize investments in adaptation, such as structural reinforcement and reconfiguration of road routes, thereby reducing the impacts of extreme weather events.

### 4.3. Data Science, Techonology, and Resilient Materials in Climate Adaptation

The integration of data science, advanced technologies, and innovative materials is essential for strengthening the resilience of infrastructure in the face of climate change challenges, transforming adaptation into a proactive, efficient, and sustainable process.

The *Internet of Things* (*IoT*) enables real-time monitoring through low-cost sensors installed on bridges (measuring vibrations and stresses), railways (monitoring track temperatures), and slopes (detecting soil moisture), allowing for the early identification of anomalies and preventing catastrophic failures. Remote sensing, using satellites and drones, provides a comprehensive view of infrastructure networks, identifying deformations and erosion, while the data collected feeds "digital twins"—virtual models that simulate the behavior of systems under various climate scenarios, testing adaptive interventions before their implementation.

Integrated climate-infrastructure modeling combines high--resolution climate projections with engineering models, predicting vulnerabilities in bridges or highways and enabling predictive maintenance and efficient planning. In addition, the use of resilient materials, such as permeable pavements, reinforced asphalt, and ultra-high-performance concrete (UHPC), prolongs the durability of infrastructures, as highlighted by de Abreu *et al.* (2022).

The synergistic combination of these approaches—monitoring, sensing, modeling, and innovative materials—enables more effective responses to climate impacts, such as simulating the performance of permeable pavements during heavy rainfall or implementing natural barriers in vulnerable areas.

## 4.4. Policies and Regulations for Resilient Infrastructure

The development of specific standards plays a central role in promoting climate-adapted infrastructure. In Brazil, Ordinance No. 622/2024, issued by the Ministry of Transport (Brasil, 2024), determines that 1% of the gross revenue from new concession contracts must be allocated to the promoting resilient infrastructure and mitigating greenhouse gas emissions. Regulation for this measure are currently under development by the National Land Transport Agency (Agência Nacional de Transportes Terrestres – ANTT), according to ANTT Resolution No. 6,057/2024. (National Land Transport Agency, 2024).

These initiatives establish clear guidelines for the sector, encouraging investments in sustainable solutions and aligning infrastructure development with climate adaptation objectives.

Despite its relevance, the ordinance has significant limitations, as its scope does not cover all transportation sectors, such as ports and railways, nor highways under exclusively public management. This restriction reduces the potential impact of the measure and highlights the need for complementary policies.

## 4.5. Innovative Financing Mechanisms

The high cost of climate adaptation requires diversification of funding sources, to overcome the constraints of public budgets. Innovative financial instruments play a crucial role in mobilizing resources for resilient infrastructure projects. Green bonds, which raise capital for sustainable initiatives, as well as international climate funds, such as those managed by the World Bank, offer viable alternatives for financing adaptation. Public-private partnerships (PPPs) with specific resilience clauses encourage private-sector engagement, promoting sharing of risks and benefits.

In addition, parametric insurance offers an effective solution for post-disaster recovery by providing quick payouts based on predefined indicators, such as rainfall intensity or wind speed. This approach ensures immediate liquidity for repair and mitiga-

tion actions, reducing the economic impacts of extreme events. The integration of these financial tools is essential to ensure the economic viability of adaptation strategies, reducing the vulnerability of transportation systems and promoting their long--term sustainability.

### 4.6. Proactive Risk Management

Risk management is an essential pillar to minimize disruptions caused by extreme weather events. Contingency plans, such as alternative routes and evacuation protocols, are indispensable for maintain the functionality of infrastructure in adverse scenarios. In Rio Grande do Sul, for example, emergency protocols that include the rapid mobilization of repair teams have proven effective in reducing impacts (Rio Grande do Sul State Government, 2024). In addition, integration with climate alert systems, such as those of the National Center for Monitoring and Alerts of Natural Disasters (Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais – Cemaden), which issued 3,620 disaster alerts in 2024, is important. This allows for the anticipation of extreme events, enabling preventive actions that reduce damage and associated costs.

### 4.7. Conceptual Framework for Adaptive Capacity in Transportation Systems

The adaptive capacity of transportation systems in the face of climate change and extreme events depends on an integrated approach that mobilizes multiple interdependent forms of capital. These “capitals”— physical, economic, human, social, and institutional—form the basis for building resilient infrastructures capable of anticipating, absorbing, and responding to climate impacts, ensuring operational continuity and socioeconomic sustainability. Understanding and strengthening these capitals are essential for developing strategies that transcend isolated technical solutions, promoting systemic and sustainable adaptation.

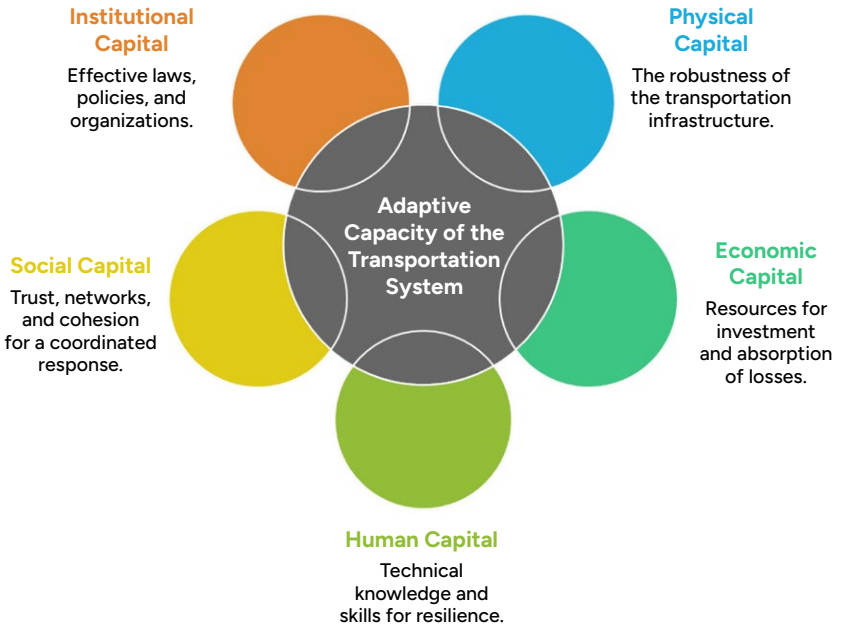



**Figure 02:** Capitals of the Adaptive Capacity of the Transport System to Climate Change. *Source: Prepared by the authors.*

## 4.8. Portfolio of Adaptive Measures

The portfolio of adaptive measures is an essential tool that guides decision-making at the strategic, tactical, and operational levels, promoting the implementation of effective measures through the intelligent and context-specific combination of diverse solutions, maximizing resilience by leveraging complementarities and addressing the specificities of each scenario. This portfolio can be structured into three broad categories: gray or hard adaptive measure; nature-based solutions; and soft adaptive measure. Each of these categories offers unique contributions to adaptation, and their application is most effective when planned in an integrated manner, considering short-, medium-, and long--term objectives.

## GRAY OR "HARD" ADAPTIVE MEASURES

Adaptive measures often referred to as "gray" or "hard" measures are characterized by robust physical interventions (engineering works) designed to increase the resistance of infrastructures to adverse weather conditions. Examples include raising highway roadbeds and bridge header levels to mitigate flood impacts, building dikes and barriers against sea level rise, and using advanced materials such as polymer-modified asphalt, which withstands extreme temperatures, or UHPC (Ultra-High Performance Concrete), known for its high strength and exceptional durability. In Brazil, initiatives such as the *Brazil Pro-Roads Program* already incorporate some of these practices, demonstrating the potential of these solutions to protect critical infrastructure. Although effective, these interventions require significant investments and must be carefully planned to avoid negative environmental impacts.

## NATURE-BASED SOLUTIONS (NBS)

Nature-based Solutions utilize natural or restored ecosystems to enhance climate resilience while providing additional benefits to society and the environment. Examples include restoring mangroves to protect coastal areas from erosion and storms, creating floodplains and flood-prone parks to manage urban flooding, and adopting permeable pavements to reduce surface runoff and minimize flooding. In addition to their adaptive function, these solutions offer significant additional benefits, such as strengthening biodiversity, creating recreational areas, and sequestering carbon. Their implementation, however, requires long-term planning and community engagement to ensure maintenance and continued effectiveness.

## "SOFT" ADAPTIVE MEASURES

Soft adaptive measures represent the basis for the successful implementation of any adaptive strategy, although they are often underestimated. These solutions encompass the development of

policies, standards, and practices that guide adaptation at different scales. They include updating design codes and technical standards to incorporate climate risks, integrating climate projections into land-use planning, strengthening early warning systems—such as those operated by Cemaden in Brazil—and developing robust contingency plans.

The recent Law No. 14,904/2024, which establishes guidelines for climate adaptation plans in Brazil, marks a significant advance in this field, reinforcing the importance of regulatory frameworks for coordinating adaptive efforts. These measures are crucial for creating an enabling environment in which engineering and nature-based solutions can be implemented effectively (Brazil, 2024).

### *THE IMPORTANCE OF INTEGRATING ADAPTIVE MEASURES*

The true strength of the adaptive measures' portfolio lies in its ability to combine gray, green and soft solutions in a synergistic manner. For example, the construction of a dike (grey solution) can be complemented by mangrove restoration (green solution) to enhance coastal protection, while updated technical standards and early warning systems (soft solutions) ensure sustainability and rapid response to extreme events. This integrated approach allows decisions to be tailored to the specific needs of each level of action: **strategic**, to set long-term priorities; **tactical**, to plan medium-term interventions; and **operational**, to execute immediate actions.

The *AdaptaVias Project* in Brazil has identified 58 specific measures (Ministério da Infraestrutura , 2021), such as drainage tunnels, floodplain management, and natural barriers (vegetation for slope stabilization), which enhance resilience to extreme weather events.

## *5. CLIMATE JUSTICE AS ADAPTIVE CAPACITY IN THE TRANSPORTATION SECTOR*

Climate justice emerges as an essential adaptive capacity for the transportation sector in the face of climate change, integrating principles of equity and sustainability as outlined in the *Brazilian*

*Climate Plan*[1] (Ministério do Meio Ambiente e Mudança do Clima, 2025). This plan establishes a national roadmap for addressing climate challenges, taking into account environmental, social and economic dimensions. By recognizing the climate crisis as an environmental, social, and human rights issue, climate justice prioritizes reparations and the restoration of rights for the most vulnerable communities, which, despite contributing less to emissions, suffer disproportionately from their impacts.

The *Climate Plan*, currently in the development phase, proposes mitigation and adaptation measures to protect critical infrastructure in the transportation sector, adopting a distributive, procedural, and intergenerational perspective (Ministério do Meio Ambiente e Mudança do Clima, 2025). This approach aims to promote inclusion and historical reparation, ensuring equitable access to safe and sustainable infrastructure. However, its implementation faces barriers, including the complexity of coordinating efforts between different levels of government, resistance from economic sectors anchored in traditional and unsustainable models, and limited financial resources for equitable actions, especially in marginalized communities.

The incorporation of an intergenerational perspective requires overcoming short-term political interests, while the procedural approach depends on broad social participation, which is often limited by inequalities in access to information and decision-making power. Overcoming these challenges is crucial for climate justice to establish itself as a robust adaptive capacity capable of guiding adaptation policies in the transportation sector.

In this context, climate justice as adaptive capacity manifests itself in two complementary approaches within the transportation sector: incremental and transformational, each with distinct characteristics and impacts.

**Incremental adaptation**, characterized by targeted adjustments such as reinforcing pavements or raising dikes, seeks to

1 Climate Plan: It is an instrument provided for in the National Policy on Climate Change (PNMC), and will serve as a guide for Brazilian climate policy through 2035. (Ministério do Meio Ambiente e Mudança do Clima, 2025).

maintain the functionality of existing systems in the face of increasing climatic stresses. This approach can be implemented immediately and is financially accessible, representing an initial step towards protecting vulnerable communities. By mitigating local damage and preserving access to essential infrastructure, it promotes restoration, ensuring rights that are often denied to marginalized populations. However, its solutions are palliative, with limited impacts in the short- and medium-term.

On the other hand, **transformational adaptation** involves profound structural changes, which are necessary when climate risks reach existential levels. Examples include relocating coastal highways inland or banning construction in high-risk areas. This approach reconfigures entire systems, promoting broader remediation by redistributing resources and infrastructure to less vulnerable areas, ensuring equitable access to safe and sustainable transportation. Its implementation, however, requires complex political decisions, social consensus and, significant investments.

According to O'Brien (2012) and Olson *et al.* (2014), transformational adaptation addresses the structural causes of vulnerability by redirecting systems towards long-term sustainable trajectories. Authors such as Adger and Jordan (2009), Feola (2015), and Wahid *et al.* (2017) highlight its ability to create new socio-ecological states and interactions, promoting resilience and equity. Unlike incremental adaptation, which offers palliative solutions, transformational adaptation represents a structural overhaul that aligns the development of the transportation sector with fair and resilient trajectories. Both incremental and transformational measures must be established taking into account an assessment of critical interdependencies, recognizing the complex connection between the different systems and factors that influence the resilience of the sector.

Climate justice, as an adaptive capacity, guides the choice between these approaches or a combination of them, transforming the transportation sector into a space for restoring rights and building an equitable future.

## 6. Cost-Benefit Analysis of Climate Adaptation in the Transportation Sector

Building adaptive capacities in the transportation sector to address climate change requires a robust economic analysis that accounts for the uncertainties inherent in the climate future. Cost-benefit analysis (CBA) is an essential tool for prioritizing adaptation investments, balancing initial costs with long-term benefits, such as reducing repair expenses, minimizing economic disruptions, and protecting lives. Global and national evidence based on the concept of the Triple Dividend *of* Resilience (TDR) reinforces that the returns of adaptation significantly outweigh the costs of inaction, especially in the transportation sector.

### 6.1. Economic Benefits and the Triple Dividend of Resilience

Investments in adaptation in the transportation sector generate economic, social, and environmental benefits, as highlighted by the Triple Dividend of Resilience (TDR): the first dividend (avoiding losses) includes reducing damage to infrastructure, such as roads and railways, during extreme weather events; the second dividend (induced economic benefits) encompasses gains such as increased logistics efficiency and reducing operating costs; and the third dividend (social and environmental benefits) involves improvements in quality of life and emissions mitigation. According to the WRI, every US$1 invested in adaptation can generate more than US$10.50 in benefits over 10 years, with average returns of 27% accross 320 evaluated projects, including the transportation sector. (World Resources Institute, 2025).

### 6.2. Costs of Inaction versus Costs of Action

Inaction on climate change results in significantly higher costs than investments in adaptation. Between January 2023 and October 2024, the Brazilian government allocated R$ 26 billion for highway maintenance, an amount that could grow exponentially

without adaptive measures. The WRI study (2025) highlights that the lack of investments in adaptation amplifies the vulnerability of critical infrastructure, raising the costs of repairs and economic disruptions. In the transportation sector, the benefits of adaptation, such as reduced losses (first dividend), are particularly high due to the impact of disruptions to supply chains and mobility.

## 6.3. Economic Methodologies for Decision-Making in the Transportation Sector

Building adaptive capacities in the transportation sector in the face of climate change depends on robust economic methodologies that guide decision-making in a context of profound uncertainties. Three main methodologies stand out as pillars for the formulation of resilient policies: the Cost-Benefit Analysis (CBA), the Real Options Analysis (AOR) and the Multicriteria Analysis (MCA).

CBA is a well-stablished methodology that compares the monetized costs of a project with its benefits, expressed in financial terms, to determine its economic viability. In the transportation sector, CBA is often used to evaluate investments in adaptation, such as the reinforcement of pavements or the elevation of bridges, which aim to reduce losses caused by extreme weather events (TDR's first dividend). For example, the Brazil Pro-Roads Program, supported by the World Bank, demonstrates that investments in preventive highway maintenance can save billions in repair costs (World Bank, 2024).

However, CBA has significant limitations. According to WRI (2025), only 31.5% of the first-dividend benefits (avoiding losses) and 26% of the second-dividend benefits (induced economic benefits, such as improved logistics efficiency) are monetized in the evaluations of adaptation projects. Intangible benefits, such as social equity or community resilience, are often excluded due to the difficulty of quantifying them. In addition, uncertainty regarding future climate scenarios compromises the accuracy of projections, underestimating the actual returns on investment. In Brazil, the scarcity of local data aggravates this problem, making it difficult to apply CBA in specific analyses to the transportation sector.

## REAL OPTIONS ANALYSIS (ROA)

AOR offers an innovative approach by treating adaptation investments as "financial options," valuing the flexibility to implement measures in phases as new climate information becomes available. This methodology is particularly well-suited for the transportation sector, where modular infrastructures—such as resilient bridges or scalable drainage systems—can be adjusted over time, minimizing risk and maximizing returns. The AOR allows, for example, to start a project with low-cost interventions, such as the reinforcement of a highway, and to postpone or escalate them based on updated climate data.

In the context of TDR, AOR facilitates the realization of the three dividends: avoiding losses (first dividend), promoting economic gains (second dividend), and generating social and environmental benefits (third dividend). In Brazil, where geographic and climatic complexity require adaptive solutions, AOR can guide investments in resilient infrastructure, such as flood-adapted ports or railways better adapted to landslides. However, its application faces barriers, such as the need for robust predictive models and the technical and legal capacity to manage multi-phase projects.

## MULTI-CRITERIA ANALYSIS (MCA)

AMC is a holistic methodology that evaluates projects based on economic, social, and environmental criteria, without requiring the full monetization of all benefits. Compatible with the TDR, the AMC allows for the incorporation of intangible benefits, such as community resilience—a process that links a network of adaptive capacities (resources with dynamic attributes) within the community to a positive trajectory of functionality and adaptation following a disturbance or adversity (Oliveira; Morais, 2018) and the reduction of emissions, which are crucial for the transportation sector. For example, the adaptation of side roads in Brazil not only reduces operating costs, but also improves access to transportation for marginalized communities, promoting social equity (third dividend).

AMC is particularly valuable in uncertain contexts, as it allows for the consideration of multiple objectives without relying solely on precise climate projections. In the transportation sector, it can be used to evaluate projects such as the relocation of coastal highways, taking into account economic (construction costs), social (access to services) and environmental (enhancement of biodiversity) impacts.

In Brazil, the scarcity of local data and the lack of standardization make it difficult to apply these economic methodologies; however, tailoring them to the specific needs of the transportation sector—such as the resilience of logistics chains—is essential to maximize the three dividends of the TDR framework (losse prevention, economic benefits, and socio-environmental gains), in order to expand the capacity for assertive decision-making.

## 7. CONCLUSION

Building adaptive capacities in the transportation sector in the face of climate change requires an integrated approach that combines robust economic methodologies, such as Cost-Benefit Analysis (CBA), which compares the costs and benefits of a project or action to determine whether the benefits outweigh the costs; Real Options Analysis (AOR), which evaluates projects taking into account the flexibility and uncertainty inherent to them; and Multicriteria Analysis (MCA), which can be applied to several areas, and helps in choosing several alternatives, with strategies that incorporate multilevel governance, climate projections, technological innovations, regulatory policies, innovative financing, and proactive risk management.

In Brazil, where extreme weather events—such as the floods in Rio Grande do Sul and the droughts in Amazônia—highlight the vulnerability of transportation infrastructure. Tailoring these methodologies to the specific demands of the sector—such as the resilience of logistics chains and equity in access to transportation—is essential to maximize the three dividends of the TDR framework: preventing losses, promoting economic benefits, and ensuring social and environmental gains. This integration, aligned

with the principles of climate justice and the Brazilian Climate Plan, can help transform the transportation sector into a driver of sustainable, equitable, and resilient development, capable of facing the uncertainties of a challenging climate future.

## REFERENCES


ABREU, V. H. S., SANTOS, A. S., & MONTEIRO, T. G. M. **Climate Change Impacts on the Road Transport Infrastructure**: A Systematic Review on Adaptation Measures. Sustainability, v.14, n. 14, p. 8864, 2022. https://doi.org/10.3390/su14148864

ADAPTABRASIL MCTI. (2025). Available at: https://adaptabrasil.mcti.gov.br/detalhes-ferrovias. Accessed on: 23 set. 2025.

NATIONAL LAND TRANSPORT AGENCY (ANTT). **Resolution No. 6,057, of November 28, 2024**. Available at: https://anttlegis.antt.gov.br/action/ActionDatalegis.php?acao=abrirTextoAto&tipo=RES&numeroAto=00006057&seqAto=000&valorAno=2024&orgao=DG/ANTT/MT&cod_modulo=623&cod_menu=9230. Accessed on: 4 nov. 2025.

BAND PARANÁ. **Tornado in Paraná exposes the effects of deforestation and the climate crisis**. Available at: https://www.band.com.br/band-parana/noticias/tornado-no-parana-expoe-efeitos-do-desmatamento-e-da-crise-climatica-202511141703. Accessed on: 25 nov. 2025.

BBC NEWS BRASIL. **Floods in Germany and Belgium**: The stunning images of the floods that left dozens dead. BBC News Brasil, 16 jul. 2021. Available at: https://www.bbc.com/portuguese/internacional-57861622. Accessed on: 26 set. 2025.

BELL, M. L., Gasparrini, A., & BENJAMIN, G. C. Climate change, extreme heat, and health. **New England Journal of Medicine**, v. 390, n.19, p. 1793-1801, 2024.

BRAZIL. **Law No. 14,904, of June 27, 2024**. Available at: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2023-2026/2024/Lei/L14904.htm. Accessed on: 6 nov. 2025.

BRAZIL. Ministry of Transport – MT. **Climate Plan**. Institutional. Brasília, DF: Ministry of Transport, 2024. Available at: https://

www.gov.br/mma/pt-br/composicao/smc/plano-clima/psm-transportes-documento-na-integra.pdf. Accessed on: 22 set. 2025.

BRAZIL. Ministry of Transport – MT. **Adaptavias Project**. Institutional. Brasília, DF: Ministry of Transport, 2021. Available at: https://www.gov.br/transportes/pt-br/assuntos/sustentabilidade/projeto-adaptavias. Accessed on: 22 set. 2025.

CHAMBER OF DEPUTIES. **Chamber approves guidelines for the preparation of adaptation plans to climate change**. 2024. https://www.camara.leg.br/noticias/1068779-camara-aprova-diretrizes-para-elaboracao-de-planos-de-adaptacao-as-mudancas-climaticas/

CARGO AND TRANSPORT. (2025). Transportation and the climate. https://cargasetransportes.com.br/2025/01/24/transporte-e-o-clima-2/de

CEPED UFSC; WORLD BANK. **Report on material damage and losses resulting from natural disasters in Brazil**: 1995 - 2014. Federal University of Santa Catarina, 2016. Available at: http://www.ceped.ufsc.br/wp-content/uploads/2017/01/111703-WP-CEPEDRelatoriosdeDanoslayout-PUBLIC-PORTUGUESE-ABSTRACT-SENT.pdf. Accessed on: 4 nov. 2025.

CNT. **Road Transport: Impacts of Asphalt Quality on Road Transport.** – Brasília: CNT, 2019. Available at: https://cdn.cnt.org.br/diretorioVirtualPrd/5fc9d21e-0498-4df0-8973-acba587ee907.pdf. Accessed on: 26 set. 2025.

NATIONAL TRANSPORT CONFEDERATION – CNT; Social Service of Transport - SEST; National Service for Transportation Learning – SENAT; Institute of Transport and Logistics – ITL. **CNT Highway Survey 2024**. Brasília-DF, 2024. Available in https://static.poder360.com.br/2024/11/Pesquisa-CNT-de-Rodovias-2024.pdf. Accessed on: 22 set. 2025.

CORREA FILHO, G. C. **The impacts of the drought in the state of Amazonas on the production of the Industrial Pole, in the period from 2022 to 2024**. 2025. Available at: https://riu.ufam.edu.br/handle/prefix/9004. Accessed on: 20 out. 2025.

DE ABREU, V. H. S., DOS SANTOS, R. F., ODA, S., & SANTOS, A. S. **Climate risk analysis in transport infrastructures:** a methodological exploration. Bulletin of the Alberto Ribeiro Lamego Environmental Observatory, v.18, n. 1, p. 28-44,2024.

EL PAÍS BRAZIL. **Storms Cause Floods in Germany, Leaving Dozens Dead and Missing**. EL PAÍS Brazil, 15 Jul. 2021. Available at: https://brasil.elpais.com/internacional/2021-07-15/inundacoes-na-alemanha-deixam-dezenas-de-mortos-e-desaparecidos.html. Accessed on: 26 set. 2025.

EXAMINATION. **Transport infrastructure and the challenges posed by climate change**. 2025. https://exame.com/bussola/a-infraestrutura-de-transportes-e-os-desafios-impostos-pelas-mudancas-climaticas/

FARIAS, ANDRÉ CORREIA DE; NASCIMENTO, JOÃO PAULO DE; SILVA, ELISA DE ANDRADE. **Quantitative assessment of the impact of floods on the functioning of critical transport infrastructure. Built Environment, v. 22, n. 4, p. 159-175**, 2022. Available at: https://www.scielo.br/j/ac/a/k5Jxhjp6L7pxX8tMXZrd7dp/?format=html&lang=pt. Accessed on: 26 nov. 2025.

FERNANDES, A. F.; MINORI, A. M.; MORAES SILVA, J. G. de. **The climate crisis and its socioeconomic and environmental impacts in the Amazon.** Aracê, v. 7, n. 4, p. 18188-18209, 2025. Available at: https://periodicos.newsciencepubl.com/arace/article/view/4423. Accessed on: 20 out. 2025.

FGV EAESP. (2024). Cost-benefit analysis (ACB) of climate change adaptation measures in the Brazilian semiarid region. https://eaesp.fgv.br/en/study-centers/center-sustainability-studies/projects/cost-benefit-analysis-acb-climate-change-adaptation-measures-brazilian-semiarid-region

G1 JORNAL NACIONAL. **Hurricane Harvey loses strength, but causes disruption in the US**. https://g1.globo.com/jornal-nacional/noticia/2017/08/furacao-harvey-perde-forca-mas-provoca-transtornos-nos-eua.html. Accessed on: 25 nov. 2025.

GZH DIGITAL. **Evaluation of the effects and impacts of floods in Rio Grande do Sul.** Nov 2024. https://issuu.com/gauchazh/docs/avalia_o_dos_efeitos_e_impactos_das_inunda_es_no. Accessed on: 25 nov. 2025.

IPCC – INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. Climate Change 2007. Synthesis Report. **Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the IPCC. Geneva:** IPCC, 2007. 104 p.

IPCC – INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **Managing the risks of extreme events and disasters to advance climate change adaptation:** a special report of Working Groups I and II of the IPCC. Cambridge: Cambridge University Press, 2012. 582 p.

JARAMILLO, P. *et al*. Transport. **In Climate Change 2022**: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, 2022.

JOSHI, K., KHAN, A., ANAND, P., & SEN, J. **Understanding the synergy between heat waves and the built environment:** a three-decade systematic review informing policies for mitigating urban heat island in cities. Sustainable Earth Reviews, v.7, n.1, p. 25,2024.

LEE, J.-Y. *et al*. **Future Global Climate**: Scenario-Based Projections and Near-Term Information. In Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Cambridge University Press, pp. 553–672, 2021.

LI, L., DING, T., GAO, H., & KE, Z. **Entire-Basin Heat Wave in the Yangtze River Is Becoming the New Normal. Journal of Applied Meteorology and Climatology**, v. 64, n. 7, p.761-775, 2025.

LYNCH, A. H., NORCHI, C. H., & LI, X. **The interaction of ice and law in Arctic marine accessibility. Proceedings of the National Academy of Sciences,** v.119, n.26, e2202720119, 2022.

MCGREGOR, G. Observed Impacts of Heatwaves. In Heatwaves: Causes, Consequences and Responses (pp. 435-489). Cham: Springer International Publishing, 2024.

MINISTRY OF INFRASTRUCTURE (BRAZIL). **Survey of climate impacts and risks on the federal infrastructure of land transport (road and rail)** ... Rio de Janeiro: GITEC/COPPE Association, 2021. 64 p. Available at: https://www.gov.br/transportes/pt-br/assuntos/sustentabilidade/produto2.pdf. Accessed on: 21 out. 2025.

MINISTRY OF THE ENVIRONMENT. (2025). **AdaptaClima**. http://adaptaclima.mma.gov.br/infraestrutura-de-transportes-e-mobilidade-no-contexto-da-mudanca-do-clima.

MINISTRY OF TRANSPORT. **An unprecedented study analyzes the impact of climate change on highways and railways in Brazil**. 2023. https://www.gov.br/transportes/pt-br/assuntos/noticias/2023/10/estudo-inedito-analisa-impacto-da-mudanca-climatica-em-rodovias-e-ferrovias-no-brasil.

ND MORE. **Impact of climate change on logistics and cargo transportation**. 2024. https://ndmais.com.br/meio-ambiente/impacto-das-mudancas-climaticas-na-logistica-e-no-transporte-de-cargas/.

NTC&Logistics. **Impact of climate change on logistics and cargo transportation**. 2024. Available at: https://www.portalntc.org.br/impacto-das-mudancas-climaticas-na-logistica-e-no-transporte-de-cargas/. Accessed on: 23 set. 2025.

O GLOBO. **Losses in Rio Bonito do Iguaçu exceed R$ 114 million after tornado in Paraná.** Available at: https://oglobo.globo.com/politica/noticia/2025/11/10/prejuizos-em-rio-bonito-do-iguacu-passam-de-r-114-milhoes-apos-tornado-no-parana.ghtml. Accessed on: 25 nov. 2025.

OLIVEIRA, ANA TERCILA CAMPOS; MORAIS, NORMANDA ARAUJO DE. **Community resilience : an integrative literature review study.** Temas psicol., Ribeirão Preto, v. 26, n. 4, p. 1371-1382, out./dez. 2018. Available at: https://pepsic.bvsalud.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1413-389X2018000400002. Accessed on: 4 nov. 2025.

PREVENTIONWEB. **Brazil needs a new approach to climate Mobility**, 2024. Disponível em: https://www.preventionweb.net/news/brazil-needs-new-approach-climate-mobility.

RAHIMITOURANPOSHTI, M., SHARMA, B., CAMUR, M. C., OMITAOMU, O. A., & LI, X. **Investigating Resiliency of Transportation Network Under Targeted and Potential Climate Change Disruptions**. arXiv preprint arXiv:2506.19102,2025.

SCIENCEDIRECT. **Planned expansion of transportation infrastructure in Brazil has implications for the pattern of agricultural production and carbon emissions**, 2024. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969724025804.

UKKUSURI, S. V., PARK, S. U., MITTAL, S., CHAPMAN, L., MANOLI, G., Santos, A., ... & ROMERO, N. We need to prepare our transport systems for heatwaves—here's how. **Nature**, v. 632, n. 8024, p. 253-256, 2024.

ECONOMIC VALUE. **Urgent adaptation**: climate change challenges infrastructure in Brazil, 2024. https://valor.globo.com/publicacoes/especiais/revista-infraestrutura-e-logistica/noticia/2024/11/14/adaptacao-urgente-mudancas-climaticas-desafiam-infraestrutura-no-brasil.ghtml.

ECONOMIC VALUE. **See how the heat is changing Brazilian highways.** Valor Econômico, June 6, 2025. Available at: https://valor.globo.com/brasil/noticia/2025/06/06/veja-como-o-calor-esta-mudando-as-rodovias-brasileiras.ghtml. Accessed on: 26 set. 2025.

WORLD BANK. **Brazil**: Equitable, Competitive and Sustainable. Washington, DC: World Bank, 2017. Disponível em: https://www.ceped.ufsc.br/wp-content/uploads/2017/01/111703-WP-CEPEDRelatoriosdeDanoslayout-PUBLIC-PORTUGUESE-ABSTRACT-SENT.pdf. Acesso em: 5 nov. 2025.

WORLD RESOURCES INSTITUTE (WRI). **Strengthening the Investment Case for Climate Adaptation**: A Triple Dividend Approach. Disponível em: https://www.wri.org/

research/climate-adaptation-investment-case. Acesso em: 26 nov. 2025.

WRI Brasil. **5 changes to transform transport and meet climate goals,** 2023. Available at: https://www.wribrasil.org.br/noticias/5-mudancas-para-transformar-os-sistemas-de-transporte-e-cumprir-metas-climaticas. Accessed on: 21 out. 202

11

# EFICIÊNCIA LOGÍSTICA COM SUSTENTABILIDADE: A IMPORTÂNCIA DA EXPANSÃO FERROVIÁRIA NO BRASIL

JEFFERSON VASCONCELOS SANTOS
E BRUNO MARQUES DOS SANTOS SILVA

## RESUMO

Este artigo busca analisar como a priorização do modo ferroviário pode alavancar a competitividade logística do agronegócio, reduzir custos logísticos e contribuir para as metas da nova Contribuição Nacionalmente Determinada (NDC). A expansão da infraestrutura ferroviária brasileira tem sido apontada como caminho estratégico para conciliar eficiência logística e compromissos climáticos. Através da utilização de uma metodologia bibliográfico-documental, a pesquisa destaca o Plano Nacional de Logística (PNL 2035), com projeção de expansão da participação ferroviária no transporte de cargas para cerca de 35% a 40% em toneladas-quilômetro até 2035, frente aos atuais 17%. O estudo revela que uma transição eficiente para ferrovias pode resultar em significativas reduções de emissões de gases de efeito estufa, comparado ao cenário atual com predominância rodoviária. O artigo também conclui que a integração entre políticas setoriais de logística e clima são condições necessárias para que o Brasil alcance simultaneamente ganhos de competitividade e redução de emissões.

### Palavras-chave

Ferrovia; Sustentabilidade; Commodities agrícolas.

# INTRODUÇÃO

O desenvolvimento da infraestrutura ferroviária no Brasil é tema de grande relevância, notadamente no contexto das políticas públicas voltadas para a sustentabilidade e eficiência logística.

Em dezembro de 2015, durante a 21ª Conferência das Partes (COP21), o Brasil, dentre outros países signatários da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima (UNFCCC), adotou o Acordo de Paris, um tratado global que estabeleceu medidas de redução de emissão de dióxido de carbono a partir de 2020.

Esse acordo buscou medidas concretas ante o impacto das mudanças climáticas em diversos setores econômicos e na sociedade, estabelecendo o compromisso dos governos de viabilizarem planos de ação com o objetivo de manter o aumento da temperatura média mundial abaixo dos 2 °C em relação aos níveis pré-industriais, assim como limitar o seu aumento a 1,5°C. Em seguida, diversos países apresentaram a Contribuição Nacionalmente Determinada (NDC), em que é estabelecido o compromisso de redução de emissões de cada país.

Em 2024, durante a 29ª Conferência das Nações Unidas sobre Mudanças Climáticas (COP29), o Brasil apresentou nova NDC, propondo novos objetivos e compromissos, como: (i) reduzir as emissões líquidas de gases de efeito estufa entre 59% e 67% até 2035, em comparação aos níveis de 2005; (ii) zerar as emissões líquidas até 2050; e (iii) transformar o modelo de desenvolvimento do país, abrangendo todos os setores da economia.

O Brasil enfrenta o desafio de melhorar o equilíbrio entre modais, para criar um sistema de transporte mais eficiente e sustentável. Ainda segundo o Plano Nacional de Logística 2035, instrumento de planejamento estratégico do setor, a expectativa é ampliar a participação ferroviária para patamares superiores a 30% (Brasil, 2021 p. 104).

Nas últimas décadas, a estagnação da malha ferroviária contrasta com o dinamismo do agronegócio, que ano a ano bate recordes de produtividade e expansão agrícola (IBGE, 2024a), com destaque para o estado do Mato Grosso, responsável por 31,4% da produção nacional (IBGE, 2024b).

## 1. PRODUÇÃO CRESCENTE DE COMMODITIES AGRÍCOLAS

O Brasil possui posição de destaque no cenário mundial, na liderança como maior produtor e exportador global de soja em grão (BNB, 2024), sendo responsável por 65% do comércio global. Segundo o nono levantamento para a safra 2024/25 da Conab (2025), o Brasil produzirá mais uma safra recorde de grãos, estimada em 336,1 milhões de toneladas, 13% ou 38,6 milhões de toneladas superior ao obtido na safra anterior. Essa ascensão decorre de ganhos de produtividade e expansão de área. Os maiores crescimentos são observados na soja, com a produção estimada em 169,6 milhões de toneladas, 21,9 milhões de toneladas acima do volume produzido em 2023/24; seguida do milho, com expectativa de produção de 128,3 milhões de toneladas, 12,8 milhões de toneladas superior à da safra anterior; e do arroz, com produção de 12,2 milhões de toneladas, 1,6 milhão de toneladas superior ao produzido em 2023/24.

Segundo o Observatório da Complexidade Econômica (OEC, 2024), em 2023, os principais exportadores de soja foram o Brasil (US$ 53,1 bilhões), os Estados Unidos (US$ 27,2 bilhões) e o Paraguai (US$ 3,26 bilhões), tendo como principais importadores a China (US$ 56,6 bilhões), a Argentina (US$ 5,41 bilhões) e o Japão (US$ 2,14 bilhões).

O agronegócio tem grande influência no Produto Interno Bruto (PIB) brasileiro. Segundo o Centro de Estudos Avançados em Economia Aplicada da Esalq/USP, em parceria com a Confederação da Agricultura e Pecuária do Brasil - CNA, o agronegócio pode representar 29,4% do PIB do Brasil em 2025 (CEPEA, 2025).

Com forte contribuição para este desenvolvimento do cenário nacional, o estado do Mato Grosso desponta como o principal produtor e exportador de grãos, com resultado maior que o dobro do segundo colocado. Conforme observado na Figura 1, o estado do Mato Grosso foi responsável por 31,5% do total das exportações brasileiras de soja. Em segundo colocado, está o estado do Paraná, com participação percentual de 13,5%, seguido de perto pelos estados de Goiás, Rio Grande do Sul, Mato Grosso do Sul e Minas Gerais, com percentuais de 11,6%, 9,7%, 7,6% e 5,5%, respectivamente (IBGE, 2025).

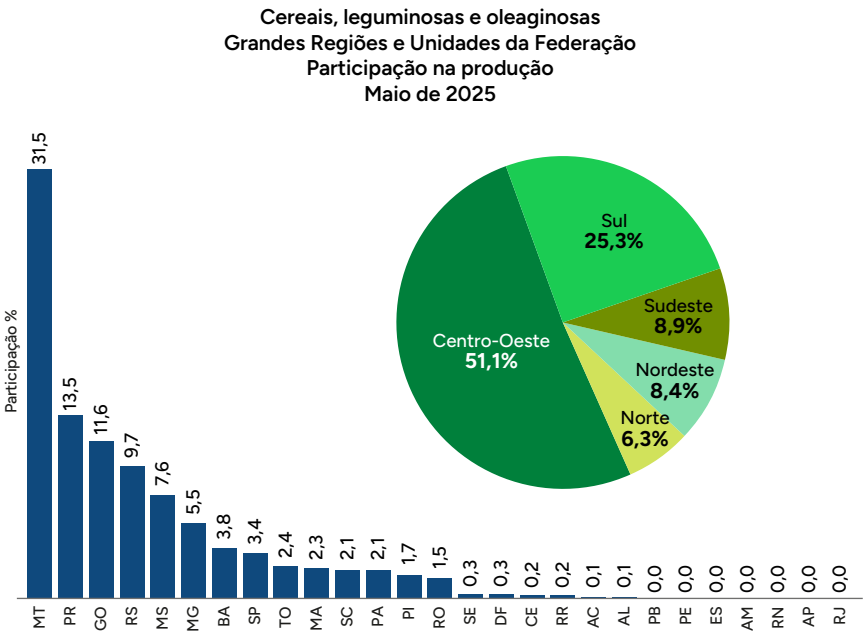



**Figura 1:** Produção por UF. *Fonte: IBGE, 2024b.*

Entretanto, a relevância produtiva e os crescentes recordes de safra do estado do Mato Grosso contrastam com sua localização geográfica, distante dos principais portos exportadores, com custos logísticos que impactam significativamente sua competitividade (Rocha e Caixeta Filho, 2018).

Em uma avaliação de competitividade, Oliveira (2014) compara os custos de produção e de transportes entre o Brasil e os Estados Unidos, como mostrado na Figura 2. O resultado de 2014 destaca relevante vantagem do Brasil no custo de produção, mas com custos logísticos duas vezes superior ao custo logístico estadunidense.

Após uma década de desenvolvimento, ganhos significativos advindos da concretização de infraestruturas logísticas importantes e dos custos logísticos explicam parte do diferencial de preço entre o Brasil e seus concorrentes. A redução dos custos de transporte por meio de melhorias de infraestrutura, como a pavimentação e concessão da rodovia BR-163 em direção aos portos de Miritituba, no Arco Norte e a conclusão da Ferrovia Norte-Sul, promovendo exportações mais eficientes, é um exemplo. Segundo

Salin e Somwaru (2020), caso o Brasil reduza seus custos de transporte em $18/Mt ou $28/Mt, a participação de mercado dos EUA pode diminuir entre 3 e 6 pontos percentuais adicionais, sendo que uma redução de 1% na participação de mercado norte-americano equivale a mais de 500 milhões de dólares em perdas de exportação.

Apesar dos recentes ganhos de competitividade, o frete brasileiro ainda consome entre 21 e 27% do custo do produto, contra os 20 a 23% dos EUA (GTR, 2025), o que reduz a margem do produtor ao exigir maiores custos de exportação.

| Custos[1] (US$/t) | EUA (Mineápolis/Minesota) | Brasil (Sorriso, MT) |
|---|---|---|
| **Custo de produção (A)** | 527,88 | 405,29 |
| **Custo de transporte (B)** | 85,94 | 166,22 |
| **Frete rodoviário** | 11,27 | 118,77 |
| **Frete hidroviário** | 26,37 | - |
| **Tarifa portuária** | 4,0 | 7,0 |
| **Frete maritimo até Shangai, China** | 44,30 | 40,45 |
| **Custo total (A + B)** | 613,82 | 571,51 |
| **Participação B/Custo total** | 14% | 29% |

(1) Média dos três primeiros trimestres de 2013, de acordo com a disponibilidade dos dados.
Fonte: Estados Unidos (2013).

**Figura 2:** Comparação entre custo de produção e de transporte de soja. *Fonte: Oliveira, 2014.*

Alguns aspectos são apontados como relevantes na perda de eficiência da logística nacional, como: (i) a predominância do uso do modo rodoviário, responsável por transportar 66% da carga agrícola do país (Brasil, 2021); (ii) o custo do transporte interno, que oscila entre 28 a 35% maior que em rotas equivalentes nos Estados Unidos e na Argentina (Pressinott, 2024); (iii) a dispersão de distâncias, com percursos médios que equivalem a 1.100 km entre a produção e o porto, frente aos <500 km médios dos EUA; e (iv) as perdas físicas de grãos, que, a exemplo do trigo, podem chegar a 11,8% em trechos longos, decorrentes da vibração em vias não pavimentadas (Bartholomeu *et al.*, 2016). Esses fatores reduzem a com-

petitividade do produto brasileiro, notadamente nos momentos de baixa dos preços internacionais.

Mesmo com todas as dificuldades logísticas apontadas, o agronegócio segue em ritmo de expansão. Segundo o Ministério da Agricultura e Pecuária (MAPA, 2024) a produção tende a crescer cerca de 27% até a safra 2033/2034, em uma área de cultivo apenas 15,5% maior que o registrado anteriormente (Figura 3).

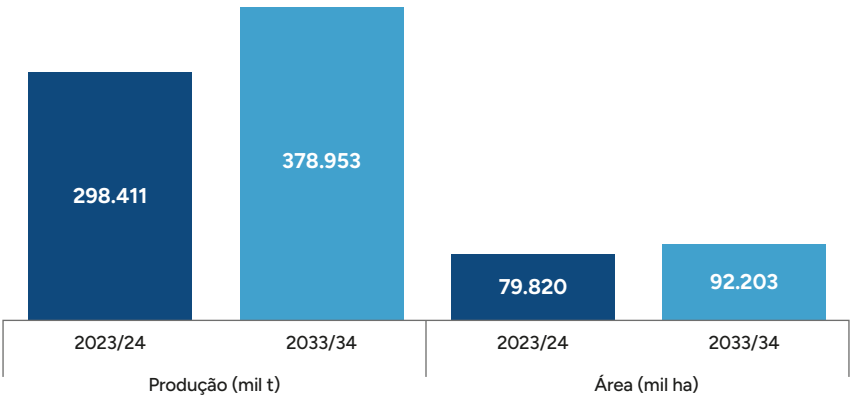



**Figura 3:** Projeções do Agronegócio - Brasil 2023/24 a 2033/34.
*Fonte: MAPA, 2024.*

Essa perspectiva de crescimento expressivo da produção nacional para a próxima década exige não apenas atenção aos investimentos em logística, mas também o uso eficiente dos modos de transporte disponíveis, com a busca permanente por redução de custos operacionais paralelamente aos ganhos de sustentabilidade no consumo energético necessário ao transporte.

Importante destacar que uma logística com alta dependência em viagens de longa distância aumenta o consumo de diesel em 22% e eleva as emissões por t.km em até 4vezes em relação ao modo ferroviário (ICCT, 2021). Com isso, se faz necessário e premente diminuir a dependência nacional do modo rodoviário, com a efetiva migração para modos de transporte mais eficientes, competitivos e ambientalmente sustentáveis em um cenário em que a eficiência energética também se coloca a cada dia como um diferencial para a redução de emissões de $CO_2$.

## 2. PLANO NACIONAL DE LOGÍSTICA - PNL 2035

O Brasil, com suas dimensões continentais e diversificada produção agrícola e mineral, enfrenta desafios logísticos significativos, com forte dependência do modal rodoviário. Este panorama resulta em custos logísticos elevados e impactos ambientais adversos. Estudos comparativos, como o de Oliveira (2014), mostram que, apesar de o Brasil ter um custo de produção agrícola competitivo, os custos logísticos são duas vezes superiores aos dos Estados Unidos, evidenciando a necessidade de diversificação de nossos modais de transporte.

A malha rodoviária federal possui 75 mil quilômetros, em contraste com os 32 mil quilômetros de ferrovias, dos quais 2/3 encontram-se ociosos ou inativos. Isso reflete a evidente opção brasileira pelo transporte rodoviário, com participação na matriz logística nacional de 66,2%, contra os 17,7% operados por ferrovias (Brasil, 2021), o que acarreta maiores custos logísticos, maior consumo de combustíveis fósseis e maiores emissões de gases de efeito estufa (GEE).

O uso do modo ferroviário como opção logística possibilita maior capacidade de transporte por viagem, com importantes ganhos para a sustentabilidade ambiental ao longo da logística de transporte adotada. Segundo Zappaz (2019), um único trem com 100 vagões pode transportar tonelagem equivalente a 357 caminhões, com emissões de 14 kg de $CO_2$ por quilômetro útil transportado, índice muito inferior aos 762 kg de $CO_2$ por quilômetro útil transportado por meio de caminhões.

O equilíbrio entre modais ainda é um desafio para a criação de um sistema de transporte eficiente e sustentável. Segundo o Plano Nacional de Logística 2035, instrumento de planejamento estratégico multimodal, a expectativa é ampliar a participação ferroviária dos atuais 17,7% para 34,6% até 2035, com redução do custo logístico médio da soja em até US$ 14/t, além de cortar 30–40 Mt $CO_2$-eq anuais até 2030 (Ghisolfi *et al.*, 2024).

A ampliação da participação ferroviária apontada pelos estudos do PNL não só promove um equilíbrio da matriz de transporte como também evidencia a necessidade de investimentos na con-

cretização de projetos de infraestrutura, relevantes à competitividade nacional frente a seus concorrentes no cenário mundial, como os EUA e a Argentina.

Os avanços recentes diminuíram a desvantagem histórica brasileira, mas ineficiências estruturais, como estradas precárias, longas distâncias, perdas de carga e custos portuários, ainda impõem sobrecusto logístico, que consome até um terço do preço FOB.

O Relatório Gerencial da Pesquisa CNT de Rodovias 2024 revela que as rodovias brasileiras são classificadas, quanto ao seu estado geral, como: ótimo (7,5%); bom (25,5%); regular (40,4%); ruim (20,8%); e péssimo (5,8%). Ou seja, em termos agregados, 67% dos 111.853 quilômetros de rodovias avaliados apresentava algum grau de precariedade.

De outro lado, o relatório trimestral *Brazil Soybean Transportation*, do USDA/AMS (2º trim./2025), indica que o componente "transporte" apresenta participação elevada no custo total entregue (*landed cost*) nas principais rotas de escoamento da soja brasileira para a Ásia e a Europa (Figuras 4 e 5).

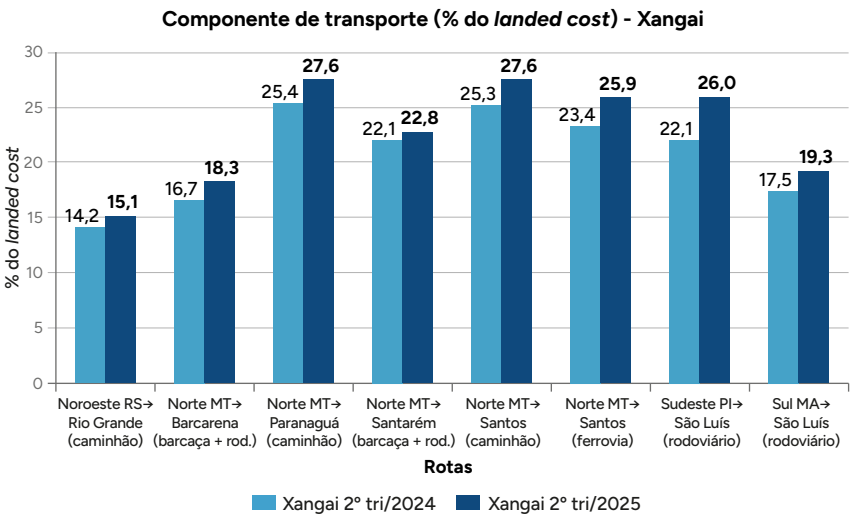



**Figura 4:** Componente de transporte (% do *landed cost*) - Xangai (2º tri/2024 vs 2º tri/2025). *Fonte: ?*

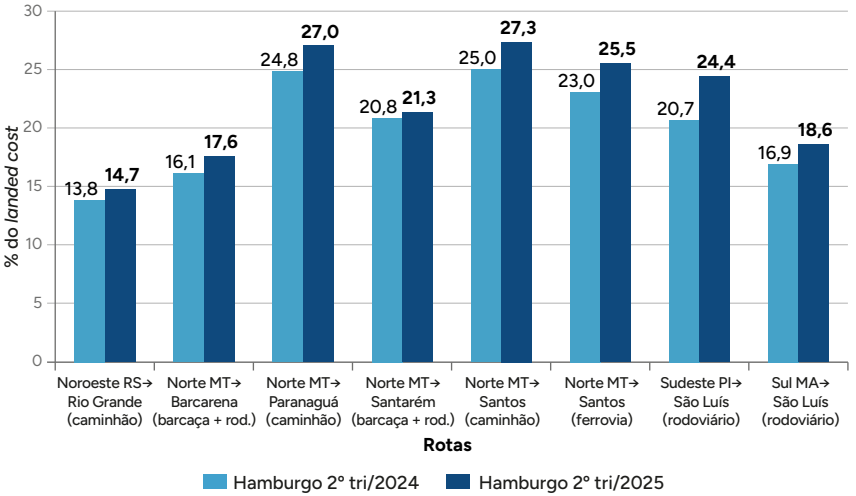



**Figura 5:** Componente de transporte (% do *landed cost*) - Hamburgo (2º tri/2024 vs 2º tri/2025). *Fonte: ?*

Nos corredores longos do Centro-Oeste, como no norte de Mato Grosso–Santos por caminhão e por ferrovia; e norte de Mato Grosso–Paranaguá por caminhão, o *share* do transporte situa-se tipicamente entre 26% e 28% em 2025, ao passo que no corredor mais curto, no noroeste do Rio Grande do Sul–Rio Grande (rodoviário) permanece próximo de 15%. Esse desnível confirma o papel das distâncias internas e do número de transbordos na formação do preço entregue, com impactos similares quando o destino é Xangai ou Hamburgo.

Ademais, a comparação temporal entre o 2º trimestre de 2024 e o 2º trimestre de 2025 evidencia tendência de alta generalizada do peso do transporte no *landed cost* em todas as rotas analisadas para ambos os destinos. Em termos relativos, esses incrementos situam-se, em geral, na faixa de aproximadamente 6% a 11% ao ano, confirmando que a logística interna continua a responder por parcela substancial do custo entregue no exterior.

Para fins de política de logística e de competitividade exportadora, esse padrão reforça a necessidade de reduzir distâncias efetivas e transbordos por meio de maior participação ferroviária e aquaviária (hidrovias e cabotagem), condição essa determi-

nante para consolidar o Brasil como uma "superpotência agrícola de baixo carbono".

Conforme dados do Observatório do Clima (2024), no que se refere ao transporte de cargas, responsável pela maior parte de consumo de diesel em veículos, é importante o investimento em "ferrovias e hidrovias para reduzir a dependência das rodovias, desde que essas novas infraestruturas não causem conflitos em áreas socioambientalmente sensíveis".

## 3. METODOLOGIA

A metodologia adotada neste artigo apresenta uma pesquisa com abordagem bibliográfica-documental, procedimento metodológico que se propaga entre a reflexão teórica e comprovação empírica, utilizando simultaneamente material acadêmico consolidado e o exame de documentos originais não analisados, a fim de construir conhecimento robusto e contextualizado (Gil, 2008).

Apesar de próximas, há importantes distinções entre a pesquisa documental e a pesquisa bibliográfica. (Oliveira, 2007) destaca a natureza das fontes como um importante elemento diferenciador. Enquanto a pesquisa bibliográfica concentra-se em fontes secundárias, com destaque para as contribuições de documentos de domínio científico de diferentes autores sobre o tema, a pesquisa documental, por sua vez, tem como matéria-prima as fontes primárias, materiais sem qualquer tratamento analítico anterior, como relatórios, cartas ou reportagens.

Neste sentido, foi realizada uma coleta bibliográfica de referência relacionada a temática de logística, infraestrutura e planejamento ferroviário, de produtividade agrícola nacional e de sustentabilidade ambiental. Também foram pesquisados documentos de bases institucionais, como Conab, IBGE, Ministério da Agricultura e Pecuária, Ministério dos Transportes e Infra S.A., considerando triagem realizada para exclusão dos documentos não compatíveis com o objeto em estudo. Com isso, foram extraídos dados de produção, custos e emissões, padronizados para unidades t.km e g $CO_2$/t.km, e comparados às perspectivas do PNL 2035 e da nova NDC.

## 4. SUSTENTABILIDADE FERROVIÁRIA

O setor de transportes responde por uma parcela significativa das emissões globais de gases de efeito estufa (GEE), tendo alcançado, no acumulado entre janeiro de 2015 e dezembro de 2023, cerca de 14% das emissões diretas globais de $CO_2$, equivalente a 84.15 bilhões de toneladas de $CO_2e$ (Climate Trace, 2025).

Em 2022, as emissões globais de $CO_2$ do setor dos transportes aumentaram mais de 250 Mt $CO_2$, para quase 8 Gt $CO_2$, retomando os patamares de emissões do período pré-pandemia da covid-19. Dentre os modais, o transporte rodoviário concentra aproximadamente 74% das emissões globais do setor, seguido pelo transporte aquaviário (11%), aéreo (10%), dutoviário (2%) e ferroviário (1%) (Figura 6).

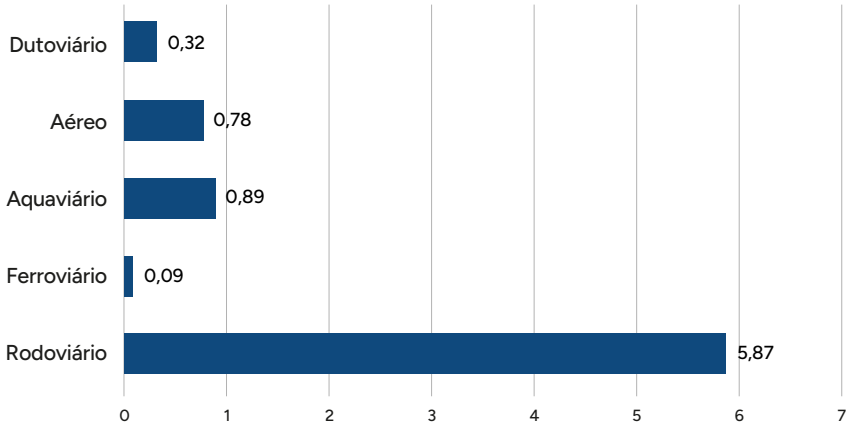



**Figura 6:** Emissões globais de $CO_2$ do setor de transportes – $GtCO_2$.
*Fonte: IEA, 2025ª.*

Segundo a *International Energy Agency* – IEA (2025a), as emissões do setor de transportes apresentaram um crescimento médio anual de 1,7% entre 1990 e 2022, um patamar elevado dentre outros setores de uso final, e equiparado ao setor industrial. Para que se possa atingir o Cenário de Emissões Líquidas Zero (NZE) até 2050, parâmetro balizador normativo do setor energético global, o setor de transportes deve reduzir suas emissões em mais de 3% ao ano até 2030 (IEA, 2025b).

No Brasil, apesar de o setor de energia não ser o mais representativo, com cerca de 18% das emissões totais em 2023, o transporte se destaca ao corresponder a 53,3% desse montante. Nele, o modo rodoviário se destaca sobremaneira, correspondendo por cerca de 92,4% das emissões setoriais, o equivalente a aproximadamente 207Mt$CO_2$e. Os demais modais apresentam baixa expressividade, com 4,5% do aéreo (10Mt$CO_2$e), 1,6% do aquaviário (3,5Mt$CO_2$e) e 1,5% do ferroviário (3,4 Mt$CO_2$e) (Figura 7).

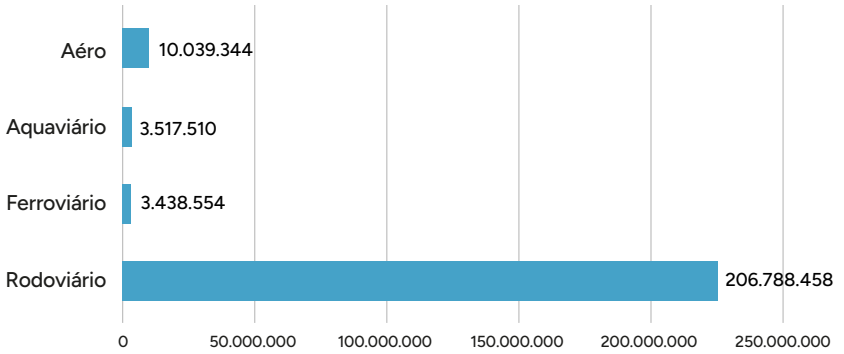



**Figura 7:** Emissões brasileiras por modo de transporte em 2023 - t$CO_2$.
*Fonte: SEEG, 2024.*

A comparação entre os diferentes modos de transporte revela contrastes expressivos em termos de eficiência energética e intensidade de emissões de gases de efeito estufa (GEE) por tonelada-quilômetro útil (TKU). O modo rodoviário apresenta eficiência energética relativamente baixa e elevada intensidade de carbono, com emissões médias variando entre 50 e 65 g$CO_2$e/TKU. Esse desempenho decorre do uso predominante de caminhões movidos a diesel, que têm menor capacidade de carga por viagem, elevado número de paradas e enfrentam congestionamentos.

Em contraste, o transporte ferroviário é significativamente mais eficiente. Mesmo em um cenário com uso de locomotivas a diesel, emite em média 8 a 10 g$CO_2$e/TKU, valor que pode ser reduzido a menos de 5 g$CO_2$e/TKU por meio da implementação de medidas que objetivam aumentar a eficiência operacional, bem como a ampliação do uso de alternativas mais sustentáveis, como biocombustíveis ou eletrificação.

## 5. NOVA NDC E OS COMPROMISSOS DO BRASIL

Conforme citado anteriormente, em 2024, o Brasil apresentou, durante a COP29, em Baku, no Azerbaijão, a nova Contribuição Nacionalmente Determinada (NDC), em que o país se comprometeu a reduzir as emissões líquidas de gases de efeito estufa entre 59% e 67% até 2035, tendo por base as emissões do ano de 2005 (2,1 $GtCO_2e$), o que corresponde a limites de emissões de 1,08 $GtCO_2e$ e 0,98 $GtCO_2e$, respectivamente. A meta de alcançar emissões líquidas zero até 2050 também foi reafirmada (Brasil, 2024a).

A nova NDC brasileira reconhece que a descarbonização da economia requer, dentre outras ações necessárias, a transformação dos sistemas de logística e de mobilidade, inserindo o setor de transportes em uma abordagem intersetorial, especialmente em articulação com a transição energética. Nesse contexto, como principal estratégia de mitigação, a NDC propõe a substituição dos combustíveis fósseis, com ênfase em eletrificação e biocombustíveis sustentáveis, mas sem estabelecer metas absolutas ou relativas específicas para o setor.

Embora a nova NDC brasileira não mencione explicitamente o reequilíbrio da matriz de transportes como vetor estruturante de descarbonização, o relatório "Como tornar o setor de transportes um contribuidor ativo para a redução das emissões brasileiras", publicado pela Coalizão dos Transportes em 2025 (CEBDS, 2025), demonstra que a ampliação da participação dos modais ferroviário e aquaviário, com a consequente redução da dependência do modal rodoviário para o transporte de cargas, é essencial para viabilizar a trajetória de emissões compatível com as metas climáticas assumidas pelo país.

O relatório identifica a mudança da matriz de transportes como um dos três vetores críticos de mitigação para o setor, ao lado da eletrificação, do *Power-to-X* e da expansão do uso de biocombustíveis. Juntos, esses três vetores respondem por aproximadamente 60% do potencial total de redução das emissões do setor de transportes até 2050.

No cenário transformacional analisado pelo estudo, o vetor de mudança na matriz de transportes, responsável por 15% do

potencial total de redução das emissões do setor até 2050, equivalente a 65 $MtCO_2e$, pressupõe uma reconfiguração expressiva da participação modal no transporte de cargas no Brasil.

O modal ferroviário, por exemplo, passaria de 357 bilhões de TKU em 2023 para 1.380 bilhões em 2050, um crescimento de quase 287%, o que o elevaria de 16% para 33% de participação na matriz. De modo semelhante, o modal aquaviário aumentaria de 346 bilhões para 922 bilhões de TKU, passando de 15% para 22% de participação. Em contrapartida, o transporte rodoviário, embora ainda em crescimento absoluto, de 1.575 para 1.930 bilhões de TKU, veria sua participação relativa cair de 69% para 46%.

Essa reconfiguração demonstra que o reequilíbrio da matriz modal não implica substituição direta, mas sim uma ampliação significativa da capacidade dos modos menos intensivos em carbono, absorvendo parcela do crescimento esperado da demanda logística nacional.

A viabilidade do cenário de reequilíbrio da matriz de transportes até 2050 pressupõe investimentos logísticos estruturantes para a conclusão das obras de implantação de novos corredores ferroviários de alta demanda agrícola e mineral, tais como a Ferrovia de Integração Centro-Oeste (FICO), a Ferrovia de Integração Oeste-Leste (FIOL), a Ferrovia Norte-Sul (FNS), a Ferrovia Nova Transnordestina e a Ferrogrão.

Holler Branco *et al.* (2022) destaca que, ao aplicar um modelo de equilíbrio de rede, simulando os fluxos inter-regionais de transporte da produção de soja e milho, constatou-se que a implementação das ferrovias planejadas reduziria o custo total de frete em 17%, bem como as emissões total de $CO_2$ em 20%, apresentando não só ganhos econômicos, mas também ganhos ambientais relevantes, com potencial para atrair financiamento privado.

Para além dos novos corredores, a ampliação da participação do modo ferroviário na matriz de transportes também pressupõe a repactuação de contratos de concessão visando à expansão e o aumento de capacidade da malha existente. Um bom exemplo é a concessão da Rumo Malha Paulista, que teve seu contrato renovado no ano de 2020, com a definição de diversos investimentos necessários à melhoria da concessão, como a eliminação de con-

flitos urbanos, duplicações e ampliação de pátios e a melhoria das condições de via. Esses investimentos estão sendo realizados conforme estabelecido, o que já permitiu que a concessionária deixasse de operar com composições de 80 vagões e passasse a operar com composições de 135 vagões.

Isso não é apenas melhoria operacional e aumento de capacidade, mas redução no consumo de combustíveis por tonelada útil transportada. Além disso, a eliminação de gargalos operacionais evita a necessidade de frenagens e retomadas de aceleração, o que também contribui para a redução do consumo energético e consequentemente da redução no volume de emissões de $CO_2$.

WANG, Zhe *et al.* (2024) indica, a partir de simulações conduzidas com o modelo espacial-econômico SIMPLE-G-Brazil, que mesmo considerando a conversão do uso da terra induzida pela implantação de novas infraestruturas de transportes, a implementação do Plano Nacional de Logística 2035 (PNL, 2035) pode gerar reduções líquidas de emissões de gases de efeito estufa (GEE) variando entre 1,8 e 30,7 milhões de toneladas de $CO_2$ até 2035, a depender da elasticidade de realocação dos fatores de produção agrícola, o que reforça a necessidade de concretização de corredores como FICO-FIOL e Ferrogrão, projetos aptos a monetizar créditos de carbono sob o novo marco regulatório (Lei n.º 15.042/2024).

Resta evidenciado, portanto, que a busca pelo equilíbrio entre modos de transporte em direção à ampliação do transporte ferroviário pode representar um ganho substancial para a estratégia brasileira de mitigação de impacto das mudanças climáticas.

## 6. MECANISMOS DE FINANCIAMENTO CLIMÁTICO

Além do aumento da participação modal, outras alavancas específicas aplicáveis ao transporte ferroviário podem ampliar seu potencial de contribuição climática. Entre essas medidas estão a eletrificação de trechos estratégicos; o uso de locomotivas híbridas ou elétricas; a substituição parcial do diesel por biocombustíveis sustentáveis; e a modernização da operação ferroviária com foco em eficiência energética.

Essas ações permitem reduzir ainda mais a já baixa intensidade de carbono do modal, tornando a ferrovia não apenas mais competitiva do ponto de vista energético, mas também mais atrativa do ponto de vista financeiro. A adoção dessas medidas qualifica o setor ferroviário para o acesso a mecanismos de financiamento climático, como *green bonds*, e também para a monetização de créditos de carbono gerados por ganhos de eficiência e substituição modal.

Com efeito, no âmbito da taxonomia internacional de finanças sustentáveis, a adoção dessas soluções posiciona os empreendimentos ferroviários como ativos verdes elegíveis, com alto grau de atratividade para investidores institucionais comprometidos com critérios ESG.

De acordo com os critérios estabelecidos pela *Climate Bonds Initiative*, entidade responsável por um dos principais frameworks internacionais de certificação de títulos verdes, projetos de transporte ferroviário serão habilitados a obtenção de certificação, desde que atendam aos critérios definidos de baixa intensidade de emissões e estejam associados à transição para fontes limpas de energia (CBI, 2024).

A possibilidade de eletrificação de ferrovias em trechos específicos, combinada às práticas de eficiência energética e substituição de combustíveis fósseis por alternativas sustentáveis, enquadra-se nas exigências estabelecidas pelo *Climate Bonds Standard – Low Carbon Transport Criteria*, sendo considerada uma estratégia prioritária para investimentos de impacto climático positivo.

Além disso, conforme destacado em estudo publicado pela *International Union of Railways* (UIC), existem metodologias reconhecidas pelos principais programas de certificação de carbono, como o Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (CDM), o *Verified Carbon Standard* (VCS) e o *Gold Standard*, que permitem a quantificação e certificação de emissões evitadas por projetos ferroviários de transição energética e mudança modal.

Tais metodologias possibilitam a geração de créditos de carbono a partir da redução mensurável, publicável e verificável de emissões de gases de efeito estufa, criando oportunidades concretas de monetização no mercado voluntário ou em esquemas regulados de comércio de emissões.

Relevante destacar a integração entre os programas internacionais de certificação de emissões evitadas e o marco regulatório nacional que criou o Sistema Brasileiro de Comércio de Emissões (SBCE), no ano de 2023 (Brasil, 2023). Projetos ferroviários certificados segundo metodologias reconhecidas internacionalmente poderão ser registrados junto à autoridade nacional e gerar créditos de carbono, negociáveis no mercado regulado brasileiro. Por outro lado, os *Green Bond Principles* (GBP), desenvolvidos pela *International Capital Market Association* (ICMA), incluem entre os projetos elegíveis para a emissão de *green bonds* aqueles voltados ao "transporte limpo", contemplando diretamente iniciativas ferroviárias de baixo carbono.

Esses princípios, amplamente adotados no mercado global, exigem a demonstração do uso ambientalmente responsável dos recursos captados, bem como critérios de seleção, monitoramento e transparência, que devem ser diretamente atendidos por empreendimentos ferroviários com comprovada eficiência energética e redução de emissões.

No contexto brasileiro, a Portaria GM/MT nº 689/2024 (Brasil, 2024b), emitida pelo Ministério dos Transportes, estabeleceu um importante marco regulatório ao reconhecer, de forma expressa, que empreendimentos ferroviários são automaticamente habilitados à emissão de debêntures incentivadas de infraestrutura em função de sua eficiência ambiental e climática. O interesse do mercado foi imediato, com o setor ferroviário tendo captado mais que o dobro de recursos do ano anterior (Figura 8).

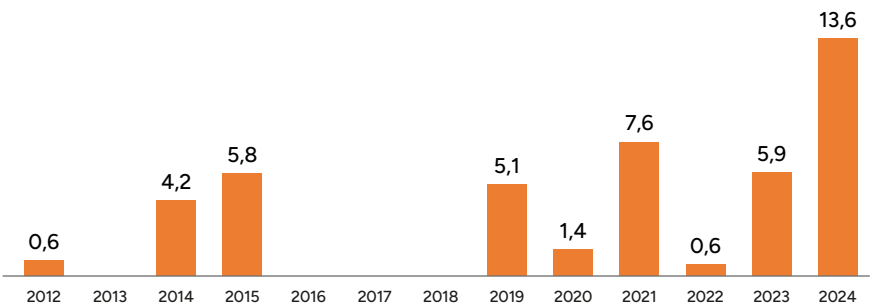



**Figura 8:** Debêntures Incentivadas autorizadas.
*Fonte: Ministério dos Transportes, 2025.*

Essa presunção de alinhamento aos critérios de elegibilidade climática representa um importante diferencial competitivo para o setor, ao reduzir barreiras transacionais e ampliar o acesso a fontes de financiamento privado e títulos verdes emitidos no mercado nacional.

Portanto, além de seu reconhecido desempenho em termos de eficiência energética e baixa intensidade de carbono, o transporte ferroviário adquire um papel estratégico adicional: o de ativo verde prioritário para a alocação de recursos financeiros em políticas de mitigação climática, conforme previsto nos instrumentos regulatórios nacionais e nos principais frameworks internacionais de finanças sustentáveis.

## 7. DISCUSSÕES E ANÁLISES

A síntese dos dados apresentados demonstra que a expansão ferroviária brasileira não é apenas uma agenda de infraestrutura, mas um elemento estratégico de política pública, capaz de articular competitividade econômica, mitigação climática e atração de capital privado. As evidências do PNL 2035 indicam que elevar a participação do modo ferroviário de 17,7 % para cerca de 35 – 40 % das toneladas-quilômetro até 2035 pode reduzir, em média, 14 US$/t no frete da soja e até 40 Mt $CO_2$e/ano nas emissões do setor de cargas.

Contudo, ainda merece reflexão crítica a necessidade de sincronização entre oferta ferroviária e demanda agrícola. As projeções de safra da Conab e do IBGE sugerem crescimento de 27% na produção de grãos até 2033/34. A não concretização dos corredores ferroviários previstos exigirá que parcela desse aumento siga escoando por rodovias, perpetuando o sobrecusto logístico e as emissões elevadas.

Outra dimensão que precisa ser considerada remete aos riscos socioambientais nos eixos de expansão. Embora o modo ferroviário apresente intensidade carbônica até 12 vezes menor que o rodoviário, projetos lineares, como o corredor FICO-FIOL, cruzam áreas sensíveis do ponto de vista biótico, físico e antrópico. A compatibilização de licenças ambientais, a criação de corredores ecoló-

gicos, a implementação de planos de manejo e de gestão territorial, além do efetivo diálogo com comunidades tradicionais e demais salvaguardas socioambientais será determinante para garantir a "legitimidade verde" desses projetos.

Nesse contexto, é fundamental se atentar para o risco de *greenwashing*, especialmente quando empreendimentos ferroviários são rotulados como sustentáveis ou elegíveis a instrumentos de financiamento verde sem comprovação de adicionalidade ambiental ou aderência a critérios robustos de monitoramento e verificação. A mitigação desses riscos exige a integração de salvaguardas climáticas nos instrumentos regulatórios e contratuais, alinhando os projetos ferroviários aos frameworks internacionais de finanças sustentáveis e aos compromissos assumidos pelo Brasil no âmbito da NDC e do SBCE. Do contrário, corre-se o risco de promover o *lock-in* de carbono, quando contratos de concessão de longo prazo são consolidados sem diretrizes climáticas claras, perpetuando práticas intensivas em emissões — como a operação prolongada com locomotivas a diesel e ausência de metas de eficiência energética.

Igualmente relevante é a capacidade institucional e coordenação federativa, necessárias para a perfeita implementação de grandes ferrovias, com governança multinível eficaz. A integração de políticas públicas em nível federal, bem como o alinhamento entre União, estados e municípios é fundamental. Experiências anteriores de renovações antecipadas — como a da Malha Paulista — demonstram que metas de investimento atreladas a indicadores de desempenho (TKU-descarbonizado, redução de gargalos urbanos) podem acelerar a entrega de resultados. Entretanto, a multiplicidade de órgãos licenciadores e a fragmentação de competências em matéria ambiental permanecem como um desafio institucional.

No campo tecnológico, a análise confirma forte potencial uso de energias renováveis, como locomotivas híbridas e digitalização da operação como vetores adicionais de redução de emissões. A adoção de combustíveis de segunda geração em locomotivas diesel-elétricas oferece ganhos imediatos, mas depende de marcos regulatórios claros para garantir oferta e rastreabilidade de biocombustíveis. O estudo destaca a relevância dos mecanismos

financeiros climáticos, onde há elegibilidade de projetos ferroviários ao uso de debêntures incentivadas, facilitando emissões de títulos verdes no mercado doméstico.

Em síntese, os resultados reforçam a robustez das premissas econômicas e ambientais do uso do modo ferroviário, mas evidenciam que seu êxito dependerá de sinergias entre planejamento logístico, governança socioambiental e inovação tecnológica.

## 8. CONCLUSÕES

O debate sobre logística e sustentabilidade climática possibilita ao Brasil uma janela de oportunidade de transformar a expansão ferroviária em um indutor da competitividade agrícola e descarbonização setorial. As evidências compiladas neste artigo reforçam que a ferrovia oferece ganhos sistêmicos, com redução de custos logísticos da cadeia produtiva da soja, e que os projetos sejam entregues com governança, transparência e rigor socioambiental.

Entretanto, sua efetivação depende de um processo decisório que vai além da autorização de obras, exigindo gestão e coordenação dos cronogramas de infraestrutura em relação as curvas de produção agrícola, evitando gargalos temporários que desloquem a carga de alto volume para modais mais intensivos em carbono. Do ponto de vista acadêmico, persistem lacunas que merecem futuras investigações, como a análise de cenários contrafactuais de desvio modal em função de atrasos nos corredores e as perdas ambientais e econômicas decorrentes da não finalização da infraestrutura ferroviária planejada, o que exigirá um acompanhamento crítico permanente da agenda de pesquisa e de políticas públicas de desenvolvimento.

## REFERÊNCIAS

ARAUJO, C. S. C. **Freight In Brazil: An assessment and outlook for improving environmental performance**, International Council on Clean Transportation, fev 2021. Disponível em: <https://theicct.org/wp-content/uploads/2021/12/brazil-freight-assessed-sept21.pdf>. Acesso em: 3 jul. 2025

BARTHOLOMEU, D. B.; ROCHA, F. V.; PÉRA, T. G.; CAIXETA FILHO, J. V. **Postharvest losses in the wheat logistics chain: a Brazilian case study**. Journal of Agricultural Science and Technology B, v. 6, p. 321-329, 2016. Disponível em: < https://www.researchgate.net/publication/317951512_Postharvest_Losses_in_the_Wheat_Logistics_Chain_A_Brazilian_Case_Study >. Acesso em: 13 out. 2025

BNB, **Caderno Setorial ETENE**. Escritório Técnico de Estudos Econômicos do Nordeste - ETENE, Banco do Nordeste, Ano 9, Nº 363, Nov, 2024

BRASIL, **Plano Nacional de Logística - PNL 2035, Relatório Executivo**. Empresa de Planejamento e Logística - EPL, 2021, Disponível em: <https://ontl.infrasa.gov.br/wp-content/uploads/2021/10/>. Acesso em: 4 jul. 2025

BRASIL. **Nova Contribuição Nacionalmente Determinada**. Brasília, 2024a. Disponível em: <https://www.gov.br/mma/pt-br/ndc-versao-em-portugues.pdf/>. Acesso em: 8 jul. 2025

BRASIL. **Portaria GM/MT nº 689, de 15 de fevereiro de 2024**. emissão de debêntures incentivadas e de infraestrutura para projetos prioritários nos setores rodoviário e ferroviário. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 2024b.

CEPEA, **PIB do Agronegócio Brasileiro**. Centro de Estudos Avançados em Economia Aplicada, Departamento de Economia, Administração e Sociologia. Esalq/USP. Disponível em: <https://www.cepea.org.br/br/pib-do-agronegocio-brasileiro.aspx>. Acesso em 7 jul. 2025

CBI, **Climate Bonds Standard: globally recognised, Paris-aligned Certification, of debt instruments, entities and assets using robust, science-based methodologies**. version 4.2. 2024, Disponível em: <www.climatebonds.net/files/documents/publications/Climate-Bonds_Climate-Bonds-Standard_V4-2_Jun-2024.pdf>. Acesso em 7 jul. 2025

CEBDS, **Coalizão dos transportes: como tornar o setor de transportes um contribuidor ativo para a redução das emissões brasileiras**. Conselho Empresarial Brasileiro para o Desenvolvimento Sustentável. Disponível em: <https://cebds.

org/publicacoes/coalizao-dos-transportes-como-tornar-o-setor-de-transportes-um-contribuidor-ativo-para-a-reducao-das-emissoes-brasileiras/>. Acesso em: 10 jul. 2025

CLIMATE TRACE. Faster, more-effective decarbonization starts with detailed knowledge of emissions sources. Disponível em: <https://climatetrace.org/sectors>, Acesso em: 8 jul 2025

CONAB, **Acompanhamento da safra brasileira: Grãos**. Safra 2024/25. 2° Levantamento. v. 12, nov. 2024. Disponível em: https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/graos. Acesso em: 14 jul 2024

CNT. **Pesquisa CNT de Rodovias 2024: relatório gerencial**. Confederação Nacional do Transporte, Brasília: CNT; SEST SENAT; ITL, 2024. 224 p. ISBN 978-85-68865-23-1 (digital). Disponível em: <https://pesquisarodovias.cnt.org.br>. Acesso em: 13 out 2025.

GIL, A. C. **Métodos e Técnicas de Pesquisa Social**. Editora Atlas, 6ª edição, São Paulo, 2008

GHISOLFI, V.; TAVASSZY, L. A.; CORREIA, G. H. A. R.; CHAVES, G. de L. D.; RIBEIRO, G. M., **Dynamics of freight transport decarbonization: A simulation study for Brazil**, Transportation Research Part D: Transport and Environment, Volume 127, February 2024. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1361920923004170>. Acessoem: 10 jul. 2025

GTR, Grain Transportation Report. **Agricultural Marketing Service**. US Department of Agriculture, july 3 2025. Disponível em: <https://www.ams.usda.gov/services/transportation-analysis/gtr>. Acesso em 5 jul. 2025.

IEA (a) **Transport. International Energy Agency**. Disponível em: <https://www.iea.org/energy-system/transport#tracking >. Acesso em: 9 jul. 2025

IEA (b) **Net Zero Emissionsby 2050 Scenario (NZE)**. Global Energy and Climate Model. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/global-energy-and-climate-model/net-zero-emissions-by-2050-scenario-nze>. Acesso em: 9 jul. 2025

IBGE (a), **Levantamento Sistemático da Produção Agrícola**. Soja. Disponível em <https://sidra.ibge.gov.br/tabela/6588#resultado>. Acesso em 7 mar. 2024

IBGE (b) **IBGE prevê safra de 332,6 milhões de toneladas para 2025**.Disponível em: <https://agenciadenoticias.ibge.gov.br/agencia-sala-de-imprensa/2013-agencia-de-noticias/releases/43684-em-maio-ibge-preve-safra-de-332-6-milhoes-de-toneladas-para-2025>. Acesso em 6jul 2025

COOPER, C.; KAMAKATÉ, F.; REINHART, T.; KROMER, M., WILSON, R. **Redução do consumo de combustível e das emissões de CO2 de caminhões combinados de longa distância para serviço pesado**, Relatório, ICCT, 2009

HOLLER BRANCO, J. E.; BARTHOLOMEU, D. B.; ALVES JÚNIOR, P. N.; CAIXETA FILHO, J. V. **Evaluation of the economic and environmental impacts from the addition of new railways to the brazilian's transportation network: An application of a network equilibrium model**. Transport Policy 124 (2022) 61–69.

OEC, Soybeans (HS: 1201) **Product Trade, Exporters and Importers**. The Observatory of Economic Complexity. Disponível em: <https://oec.world/en/profile/hs/soybeans>. Acesso em 5 jul. 2025

OLIVEIRA, M. M., **Como fazer pesquisa qualitativa**. Vozes, Petrópolis, 2007

PRESSINOTT, F. **Shipping soybeans to China mora costhy for Brazil. Associação Nacional dos Exportadores de Cereais**. Valor Internacional. 14 nov 2024. Disponível em: <https://valorinternational.globo.com/agribusiness/news/2024/11/14/shipping-soybeans-to-china-more-costly-for-brazil.ghtml >, Acesso em: 14 out 2025

SALIN, D.L, SOMWARU, A. **The Impact of Brazil's Infrastructure and Transportation Costs on U.S. Soybean Market Share: An Updated Analysis From 1992-2019**. U.S. Department of Agriculture, Agricultural Marketing Service. Nov 2020. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.9752/TS290.11-2020>. Acesso em: 4 jul. 2025

SALIN, D. Brazil Soybean Transportation. Washington, DC. U.S. **Department of Agriculture, Agricultural Marketing Service**. Ago 2025. Disponível em <http://dx.doi.org/10.9752/TS052.08-2025>. Acesso em: 13 out 2025

SEEG, Dados do SEEG. **Tabela Geral. Sistema de Estimativas de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa**. 2024. Disponível em: <https://seeg.eco.br/dados/>. Acesso em: 9 jul. 2025

WANG, ZHAN; MARTHA JR., GERALDO B.; LIU, JING; LIMA, CICERO Z.; HERTEL, THOMAS W. **Planned expansion of transportation infrastructure in Brazil has implications for the pattern of agricultural Productions and carbon emissions**. Science of The Total Environment, 928 (2024) 172434.

11

# *LOGISTICAL EFFICIENCY AND SUSTAINABILITY: THE IMPORTANCE OF RAILWAY EXPANSION IN BRAZIL*

JEFFERSON VASCONCELOS SANTOS
E BRUNO MARQUES DOS SANTOS SILVA.

## *SUMMARY*

This article seeks to analyze how prioritizing rail transport can boost the logistics competitiveness of agribusiness, reduce logistics costs, and contribute to the goals of the new Nationally Determined Contribution (NDC). The expansion of Brazilian railway infrastructure has been pointed out as a strategic path to reconciling logistics efficiency and climate commitments. Using a bibliographic-documentary methodology, the research highlights the National Logistics Plan (PNL 2035), which projects an expansion of the railroad share in cargo transport to about 35% to 40% in ton-kilometers by 2035, up from the current 17%. The study reveals that an efficient transition to railways could result in significant reductions in greenhouse gas emissions compared to the current scenario, which is dominated by road transport. The article also concludes that the integration between sectoral logistics and climate policies is a necessary condition for Brazil to simultaneously achieve gains in competitiveness and reductions in emissions.

**Keywords:**

Railroad; Sustainability; Agricultural commodities.

## INTRODUCTION

The development of railway infrastructure in Brazil is a topic of great importance, particularly in the context of public policies aimed at sustainability and logistical efficiency.

In December 2015, during the 21st Conference of the Parties (COP21), Brazil, along with other signatory countries to the United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC), adopted the Paris Agreement, a global treaty that established measures to reduce carbon dioxide emissions starting in 2020.

This agreement sought concrete measures to address the impact of climate change on various economic sectors and society, establishing a commitment by governments to implement action plans aimed at keeping global average temperature rise below 2 °C compared to pre-industrial levels, as well as limiting its increase to 1.5°C. Subsequently, several countries presented their Nationally Determined Contribution (NDC), which establishes each country's commitment to reducing emissions.

In 2024, during the 29th United Nations Climate Change Conference (COP29), Brazil presented a new NDC, proposing new goals and commitments, such as: (i) reducing net greenhouse gas emissions by between 59% and 67% by 2035, compared to 2005 levels; (ii) achieving net-zero emissions by 2050; and (iii) transforming the country's development model, encompassing all sectors of the economy.

Brazil faces the challenge of improving the balance between different modes of transport to create a more efficient and sustainable transport system. According to the National Logistics Plan 2035, a strategic planning instrument for the sector, the goal is to increase the share of rail transport to over 30% (Brasil, 2021, p. 104).

In recent decades, the stagnation of the rail network has stood in stark contrasts to the dynamism of agribusiness, which year after year breaks records for productivity and agricultural expansion (IBGE, 2024a), with the state of Mato Grosso standing out as the leading contributor, responsible for 31.4% of national production (IBGE, 2024b).

## 1. GROWING PRODUCTION OF AGRICULTURAL COMMODITIES

Brazil holds a prominent position on the world stage, leading as the world's largest producer and exporter of soybeans (BNB, 2024), accounting for 65% of global trade. According to Conab's ninth survey for the 2024/25 crop year (2025), Brazil will produce another record grain harvest, estimated at 336.1 million tons—13% or 38.6 million tons higher than that obtained in the previous harvest. This rise is due to productivity gains and expanded acreage. The largest increases are seen in soybeans, with production estimated at 169.6 million tons, 21.9 million tons above the volume produced in 2023/24; followed by corn, with an expected production of 128.3 million tons, 12.8 million tons higher than in the previous harvest; and rice, with production of 12.2 million tons, 1.6 million tons higher than in 2023/24.

According to the Observatory of Economic Complexity (OEC, 2024), in 2023, the leading soybeans exporters were Brazil (US$ 53.1 billion), the United States (US$ 27.2 billion), and Paraguay (US$ 3.26 billion), with the main importers being China (US$ 56.6 billion), Argentina (US$ 5.41 billion), and Japan (US$ 2.14 billion).

Agribusiness has a great influence on Brazil's Gross Domestic Product (GDP). According to the Center for Advanced Studies in Applied Economics at Esalq/USP, in partnership with the Confederation of Agriculture and Livestock of Brazil - CNA, agribusiness could account for 29.4% of Brazil's GDP in 2025 (CEPEA, 2025).

With a strong contribution to this development of the national scenario, the state of Mato Grosso stands out as the main producer and exporter of grains, with a volume more than double that of the second place. As observed in Figure 1, the state of Mato Grosso accounted for 31.5% of Brazil's total soybean exports. In second place is the state of Paraná, with a 13.5% share, closely followed by the states of Goiás, Rio Grande do Sul, Mato Grosso do Sul, and Minas Gerais, with shares of 11.6%, 9.7%, 7.6%, and 5.5%, respectively (IBGE, 2025).

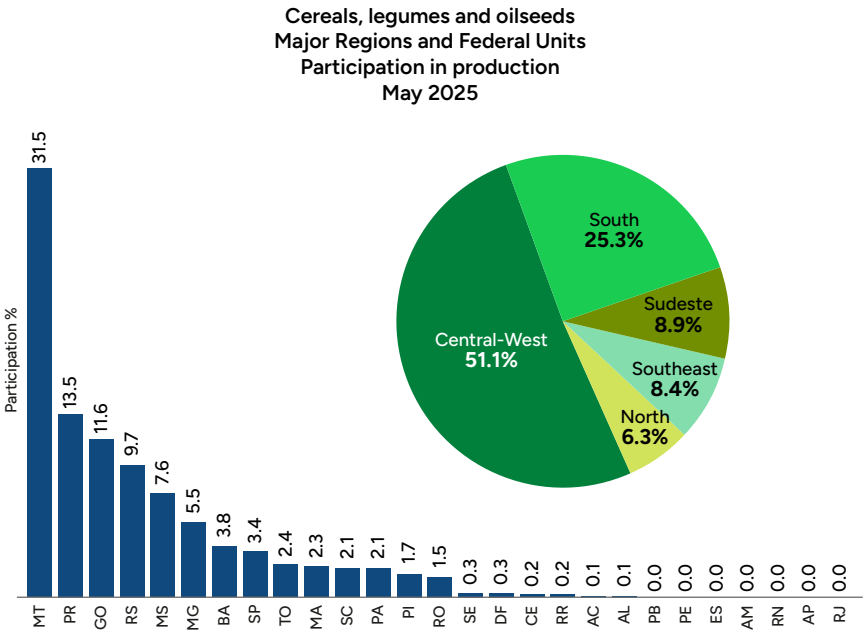



**Figure 1:** Production by state. *Source: IBGE, 2024b.*

However, the state of Mato Grosso's agricultural importance and record-breaking harvests contrast with its geographic location, which is far from the main exporting ports, resulting in logistics costs that significantly impact its competitiveness (Rocha and Caixeta Filho, 2018).

In a competitiveness analysis, Oliveira (2014) compares the production and transportation costs between Brazil and the United States, as shown in Figure 2. The 2014 result highlights a significant advantage from Brazil in terms of production costs, but with logistics costs that are twice as high as those in the United States.

After a decade of development, significant gains resulting from the completion of key logistics infrastructures and lower logistics costs account for part of the price differential between Brazil and its competitors. Reducing transportation costs through infrastructure improvements—such as the paving and concession of the BR-163 highway towards the ports of Miritituba, in the Arco

Norte region and the completion of the North-South Railway, thereby promoting more efficient exports—is one example. According to Salin and Somwaru (2020), if Brazil reduces its transportation costs by $18/Mt or $28/Mt, the U.S. market share could decrease by an additional 3 to 6 percentage points, with a 1% reduction in the U.S. market share equating to more than 500 million dollars in export losses.

Despite recent gains in competitiveness, shipping costs in Brazil still account for between 21 and 27% of the product's cost, compared to 20 to 23% in the U.S. (GTR, 2025), which reduces producer's margin by driving up export costs.

| Costs (US$/t) | USA (Mineapolis/Minesota) | Brazil (Sorriso, MT) |
|---|---|---|
| **Production cost (A)** | 527.88 | 405.29 |
| **Transportation cost (B)** | 85.94 | 166.22 |
| **Road freight** | 11.27 | 118.77 |
| **Waterway freight** | 26.37 | - |
| **Port tariff** | 4.0 | 7.0 |
| **Sea freight to Shanghai, China** | 44.30 | 40.45 |
| **Total cost (A + B)** | 613.82 | 571.51 |
| **Participation B/Total Cost** | 14% | 29% |

Average of the first three quarters of 2013, according to data availability.
Source: United States (2013).

**Figure 2:** Comparison between soybean production and transportation costs.
*Source: Oliveira, 2014.*

Some aspects are highlighted as contributing to the loss of efficiency in the country's logistics sector, such as: (i) the predominant use of road transport, which accounts for 66% of the country's agricultural cargo (Brasil, 2021); (ii) the cost of domestic transport, which is 28 to 35% higher than on equivalent routes in the United States and Argentina (Pressinott, 2024); (iii) the dispersion of distances, with average distances of 1,100 km between production sites and ports, compared to an average of <500 km in the U.S.; and (iv)

physical grains losses, which, as in the case of wheat, can reach 11.8% on long stretches due to vibration on unpaved roads (Bartholomeu *et al.*, 2016). These factors reduce the competitiveness of Brazilian products, particularly during periods of low international prices.

Despite all the logistical challenges highlighted, the agribusiness sector continues to expand. According to the Ministry of Agriculture and Livestock (MAPA, 2024), production tends to grow about 27% by the 2033/2034 harvest, with a cultivated area only 15.5% larger than previously recorded (Figure 3).

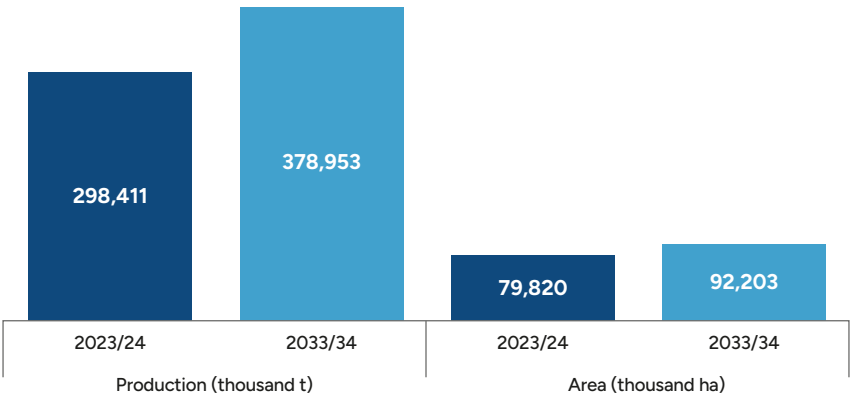



**Figure 3:** Agribusiness Projections - Brazil 2023/24 to 2033/34.
*Source: MAPA, 2024.*

This outlook for significant growth in domestic production over the next decade requires not only a focus on investments in logistics, but also the efficient use of available modes of transportation, with a constant effort to reduce operating costs while improving the sustainability of the energy consumption required for transportation.

It is important to note that logistics operations heavily reliant on long-distance travel increases diesel consumption by 22% and raise emissions per t.km by up to four times compared to rail transport (ICCT, 2021).

Consequently, it is necessary and urgent to reduce the country's dependence on road transport, with an effective shift toward

more efficient, competitive, and environmentally sustainable modes of transport in a scenario in which energy efficiency is also increasingly becoming a key factor in reducing $CO_2$ emissions.

## 2. NATIONAL LOGISTICS PLAN - PNL 2035

Brazil, with its continental dimensions and diverse agricultural and mineral production, faces significant logistical challenges, with a heavy reliance on road transport. This situation results in high logistics costs and adverse environmental impacts. Comparative studies, such as that by Oliveira (2014), show that although Brazil has competitive agricultural production costs, logistics costs are twice as high as those in the United States, highlighting the need to diversify our modes of transportation.

The federal highway network spans 75,000 kilometers, in contrasts to the 32,000 kilometers of railways, two-thirds of which are idle or inactive. This reflects Brazil's clear preference for road transport, which accounts for 66.2% of the national logistics matrix, compared to 17.7% operated by rail (Brasil, 2021), resulting in higher logistics costs, greater consumption of fossil fuels, and higher greenhouse gas (GHG) emissions.

The use of the rail transport as a logistics option enables greater transport capacity per trip, with significant gains for environmental sustainability throughout the transport logistics process. According to Zappaz (2019), a single train with 100 wagons can transport a tonnage equivalent to 357 trucks, with emissions of 14 kg of $CO_2$ per useful kilometer transported—a figure far lower than the 762 kg of $CO_2$ per useful kilometer transported by trucks.

Achieving a balance among transport modes remains a challenge in creating an efficient and sustainable transportation system. According to the National Logistics Plan 2035, a multimodal strategic planning tool, the goal is to increase rail's share from the current 17.7% to 34.6% by 2035, reducing the average logistics cost of soybeans by up to $14/t and cutting annual $CO_2$ -eq annually by 2030 (Ghisolfi *et al.*, 2024).

The increase in rail transport use highlighted by the PNL studies not only promotes a balanced transport mix but also unders-

cores the need for investments in infrastructure projects, that are critical to national competitiveness against global rivals such as the USA and Argentina.

Recent advances have narrowed Brazil's historical disadvantage, but structural inefficiencies—such as precarious roads, long distances, cargo losses, and port costs—still impose additional logistics costs, which account for up to one-third of the FOB price.

The Management Report of the CNT Highway Survey 2024 reveals that Brazilian highways are classified, in terms of their general condition, as: excellent (7.5%); good (25.5%); regular (40.4%); bad (20.8%); and very bad (5.8%). In other words, overall, 67% of the 111,853 kilometers of highways evaluated had some degree of disrepair.

On the other hand, the USDA/AMS *Brazil Soybean Transportation* quarterly report (Q2/2025) indicates that the "transportation" component accounts for a significant portion of the landed cost on the main shipping routes routes for Brazilian soybeans to Asia and Europe (Figures 4 and 5).

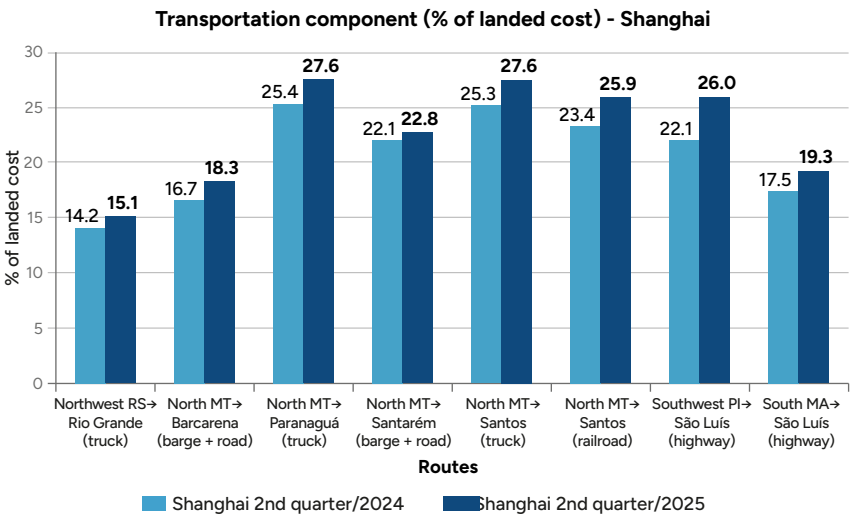



**Figure 4:** Transport component (% of landed cost) - Shanghai (Q2/2024 vs Q2/2025). *Source: ?*

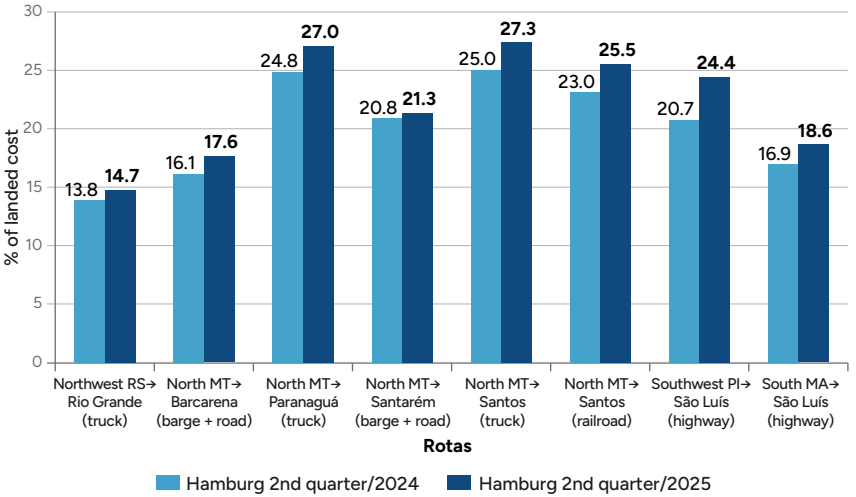



**Figure 5:** Transport component (% of landed cost) - Hamburg (Q2/2024 vs Q2/2025). *Source: ?*

In the long corridors of the Midwest, such as the northern Mato Grosso–Santos corridor via truck and rail; and northern Mato Grosso–Paranaguá by truck, the transport share typically ranges between 26% and 28% in 2025, whereas in the shorter corridor, in northwestern Rio Grande do Sul–Rio Grande corridor (road), it remains close to 15%. This disparity confirms the role of internal distances and the number of transshipments in determining the delivered price, with similar impacts whether the destination is Shanghai or Hamburg.

Furthermore, a year-over-year comparison between the second quarter of 2024 and the second quarter of 2025 reveals a general upward trend in the share of transportation cost within the landed cost across all routes analyzed for both destinations. In relative terms, these increases generally ranges from approximately 6% to 11% per year, confirming that domestic logistics continues to account for a substantial portion of the delivered cost overseas.

From the perspective of logistics policy and export competitiveness, this trend underscores the need to reduce actual distances and transshipments through greater use of rail and water

transport (waterways and coastal shipping), a key factor in establishing Brazil as a "low-carbon agricultural superpower."

According to data from the Climate Observatory (2024), with regard to freight transport—which accounts for the majority of diesel consumption by vehicles—it is important to invest in "railways and waterways to reduce dependence on highways, provided that this new infrastructure do not cause conflicts in socio-environmentally sensitive areas."

## 3. METHODOLOGY

The methodology adopted in this article involves bibliographic-documentary approach, a methodological procedure that bridges theoretical reflection and empirical validation, drawing simultaneously on established academic literature and the examination of unanalyzed original documents in order to build robust and contextualized knowledge (Gil, 2008).

Although closely related, there are important distinctions between documentary research and bibliographic research. Oliveira (2007) highlights the nature of the sources as a key distinguishing factor. While bibliographic research focuses on secondary sources, with an emphasis on scientific documents by various authors on the topic, documentary research, in turn, uses primary sources as its raw material—materials that have not undergone any prior analytical processing, such as reports, letters, or new articles.

In this sense, a bibliographic collection of reference was conducted on topics related to logistics, infrastructure and railway planning, as well as national agricultural productivity and environmental sustainability. Documents from institutional sources such as Conab, IBGE, Ministry of Agriculture and Livestock, Ministry of Transport and Infra S.A. were also examined, with a screening process to exclude documents not relevant to the subject under study. As a result, data on production, cost and emissions were extracted, standardized to units of t.km and g $CO_2$/t.km, and compared to the projections of the PNL 2035 and the new NDC.

## 4. RAILWAY SUSTAINABILITY

The transportation sector accounts for a significant share of global greenhouse gas (GHG) emissions, having accounted for approximately 14% of global direct $CO_2$ emissions between January 2015 and December 2023, equivalent to 84.15 billion tons of $CO_2e$ (Climate Trace, 2025).

In 2022, global $CO_2$ emissions from the transportation sector increased by more than 250 Mt $CO_2$, reaching nearly 8 Gt $CO_2$, returning to pre-pandemic COVID-19 pandemic emission levels. Among the modes of transport, road transport accounts for approximately 74% of the sector's global emissions, followed by water transport (11%), air transport (10%), pipeline transport (2%), and rail transport (1%) (Figure 6).

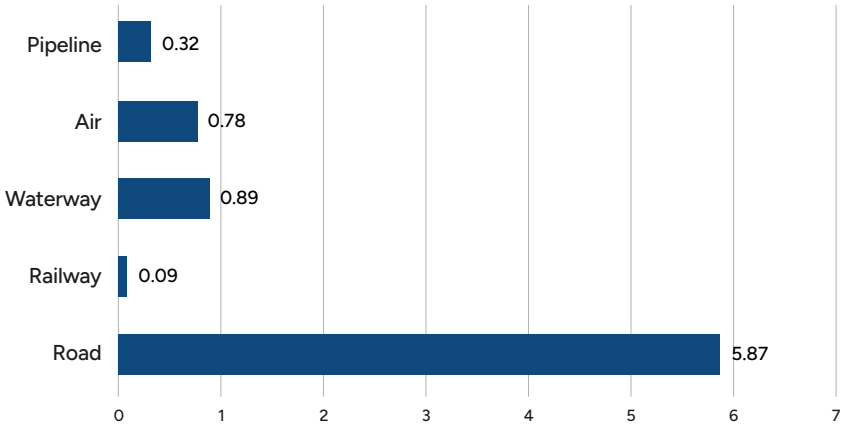



**Figure 6:** Global $CO_2$ emissions from the transport sector – $GtCO_2$.
*Source: IEA, 2025a*

According to the International Energy Agency (IEA) (2025a), emissions from the transportation sector grew at an average annual rate of 1.7% between 1990 and 2022, a high rate compared to other end-use sectors and om par with the industrial sector. To achieve the Net Zero Emissions (NZE) scenario by 2050—the normative parameter for the global energy sector—the transportation sec-

tor must reduce its emissions by more than 3% per year through 2030 (IEA, 2025b).

In Brazil, although the energy sector is not the largest contributor—accounting for about 18% of total emissions in 2023—transportation stands out, accounting for 53.3% of that total. Within transportation, road transport is by far the largest contributor, accounting for about 92.4% of sectoral emissions, equivalent to approximately 207Mt$CO_2$e. The other modes are less relevant, with air transport accounting for 4.5% (10 Mt$CO_2$e), water transport for 1.6% (3.5 Mt$CO_2$e), and rail transport for 1.5% (3.4 Mt$CO_2$e) (Figure 7).

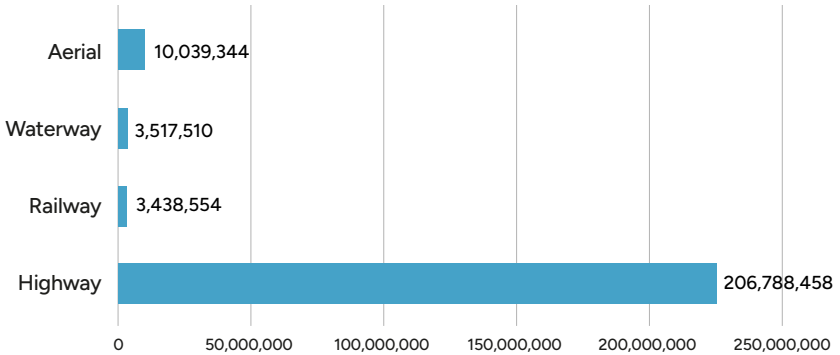



**Figure 7:** Brazilian emissions by mode of transport in 2023 – t$CO_2$.
*Source: SEEG, 2024.*

A comparison of different modes of transport reveals significant contrasts in terms of energy efficiency and intensity of greenhouse gas (GHG) emissions per ton-kilometer (TKU). Road transport exhibits relatively low energy efficiency and high carbon intensity, with average emissions ranging from 50 to 65 g$CO_2$e/TKU. This performance is due to the predominant use of diesel-powered trucks, which have lower load capacity per trip, a high number of stops and face traffic congestion.

In contrast, rail transport is significantly more efficient. Even in a scenario involving diesel locomotives, it emits an average of 8 to 10 g$CO_2$e/TKU, a figure that can be reduced to less than 5 g$CO_2$e/TKU through the implementation of measures aimed at

increasing operational efficiency, as well as the expanded use of more sustainable alternatives, such as biofuels or electrification.

## 5. BRAZIL'S NEW NDC AND ITS COMMITMENTS

As mentioned earlier, in 2024, Brazil presented its new Nationally Determined Contribution (NDC) at COP29, in Baku, Azerbaijan, in which the country committed to reducing net greenhouse gas emissions by between 59% and 67% by 2035, based on 2005 emissions (2.1 $GtCO_2e$), corresponding to emission limits of 1.08 $GtCO_2e$ and 0.98 $GtCO_2e$, respectively. The goal of achieving net-zero emissions by 2050 was also reaffirmed (Brasil, 2024a).

Brazil's new NDC recognizes that decarbonizing the economy requires, among other necessary actions, the transformation of logistics and mobility systems, inserting the transportation sector in a cross-sectoral approach, particularly in conjunction with the energy transition. In this context, as its main mitigation strategy, the NDC proposes the replacement of fossil fuels, with an emphasis on electrification and sustainable biofuels, but without establishing specific absolute or relative targets for the sector.

Although Brazil's new NDC does not explicitly mention rebalancing of transport mix as a key driver of decarbonization, the report "How to make the transport sector an active contributor to the reduction of Brazilian emissions", published by the Transport Coalition in 2025 (CEBDS, 2025), demonstrates that increasing the share of rail and waterway transport, with the consequent reduction in reliance on road transport for freight, is essential to enable an emissions trajectory compatible with the climate targets adopted by the country.

The report identifies the transition of the transportation mix as one of the three key mitigation strategies for the sector, alongside electrification, Power-to-X, and the expanded use of biofuels. Together, these three strategies account for approximately 60% of the total potential for reducing emissions in the transportation sector by 2050.

In the transformational scenario analyzed by the study, the driver of change in the transportation matrix—accounting for 15%

of the sector's total emissions reduction potential by 2050, equivalent to 65 $MtCO_2e$—implies a significant shift in the modal share of freight transportion in Brazil.

Rail transport, for example, would rise from 357 billion TKU in 2023 to 1,380 billion in 2050, an increase of nearly 287%, which would raise its share of the transport mix from 16% to 33%. Similarly, waterway transport would increase from 346 billion to 922 billion TKU, rising from 15% to a 22% share. In contrast, road transport, although still growing in absolute terms—from 1,575 to 1,930 billion TKU—would see its relative share fall from 69% to 46%.

This restructuring demonstrates that rebalancing the modal mix does not entail direct substitution, but rather a significant expansion of the capacity of less carbon-intensive modes, absorbing part of the expected growth in national logistics demand.

The feasibility of the plan to rebalance the transportation network by 2050 requires major infrastructure investments in logistics to complete the construction of new railway corridors serving high agricultural and mineral demand, such as the Midwest Integration Railway (FICO), the West-East Integration Railway (FIOL), the North-South Railway (FNS), the Nova Transnordestina Railway, and the Ferrogrão.

Holler Branco *et al.* (2022) note that, by applying a network equilibrium model to simulate interregional transport flows of soybean and corn production, it was found that the implementation of the planned railways would reduce total cost freight cost by 17%, as well as the total $CO_2$ emissions by 20%, yielding not only economic gains but also significant environmental benefits, with the potential to attract private financing.

In addition to the new corridors, increasing the share of rail transport in the overall transport system also requires the renegotiation of concession contracts aimed at expanding and increasing the capacity of the existing network. A good example is the Rumo Malha Paulista concession, which contract was renewed in 2020, with the definition of various investments necessary to improve the concession, such as the elimination of urban conflicts, track duplication, yard expansion, and road conditions improvement. These investments are being carried out as planned, which has already

allowed the concessionaire to transition from operating trains of 80 cars to trains of 135 cars.

This is not only an improvement in operations and an increase in capacity, but also a reduction in fuel consumption per ton of cargo transported. In addition, the elimination of operational bottlenecks avoids the need for braking and acceleration, which also contributes to lower energy consumption and, consequently, a reduction in $CO_2$ emissions.

Wang, Zhe *et al.* (2024) indicate, based on simulations conducted using the SIMPLE-G-Brazil spatial-economic model, that even when accounting for land-use changes induced by the deployment of new transportation infrastructure, the implementation of the National Logistics Plan 2035 (PNL, 2035) can generate net reductions in greenhouse gas (GHG) emissions ranging from 1.8 and 30.7 million tons of $CO_2$ by 2035, depending on the elasticity of reallocation of agricultural production factors, which reinforces the need to implement corridors such as FICO-FIOL and Ferrogrão, projects capable of monetizing carbon credits under the new regulatory framework (Law No. 15,042/2024).

It is therefore clear that the effort to achieving a balance among modes of transportation—with a focus on expanding rail transport—could represent a substantial gain for Brazil's strategy to mitigate the impacts of climate change.

## 6. CLIMATE FINANCE MECHANISMS

In addition to increasing the modal share, other specific measures applicable to rail transport can enhance its potential to contribute to climate action. These measures include the electrification of strategic stretches; the use of hybrid or electric locomotives; the partial replacement of diesel with sustainable biofuels; and the modernization of rail operations with a focus on energy efficiency.

These initiatives make it possible to further reduce the rail sector's already low carbon intensity, making rail not only more energy-efficient but also more financially attractive. The adop-

tion of these measures qualifies the rail sector for access to climate financing mechanisms, such as green bonds, as well as for the monetization of carbon credits generated by efficiency gains and modal shift.

In fact, within the scope of international taxonomy of sustainable finance, the adoption of these solutions positions railway projects as eligible green assets, making them highly attractive to institutional investors committed to ESG criteria.

According to the criteria established by the *Climate Bonds Initiative*, the organization responsible for one of the leading international frameworks for green bonds certification, rail transport projects will be eligible for certification provided they meet the defined low-emissions criteria and are associated with the transition to clean energy sources (CBI, 2024).

The possibility of electrifying specific sections of railways, combined with energy efficiency measures and the replacement of fossil fuels with sustainable alternatives fits the requirements established by the *Climate Bonds Standard – Low Carbon Transport Criteria* and is considered a priority strategy for investments with a positive climate impact.

In addition, as highlighted in a study published by the *International Union of Railways* (UIC), there are methodologies recognized by major carbon certification programs—such as the Clean Development Mechanism (CDM), the *Verified Carbon Standard* (VCS) and the *Gold Standard*—that enable the quantification and certification of emissions avoided through railway projects focused on energy transition and modal shift.

These methodologies enable the generation of carbon credits through measurable, reportable, and verifiable reductions in greenhouse gas emissions, creating concrete opportunities for monetization in the voluntary market or in regulated emissions trading schemes.

It is worth noting the integration between international certification programs for avoided emissions and the national regulatory framework that established the Brazilian Emissions Trading System (Sistema Brasileiro de Comércio de Emissões – SBCE), in

2023 (Brasil, 2023). Railway projects certified according to internationally recognized methodologies may be registered with the national authority and generate carbon credits, which are tradable on the Brazilian regulated market. On the other hand, the *Green Bond Principles* (GBP), developed by the *International Capital Market Association* (ICMA), include among the projects eligible for the issuance of green bonds those focused on "clean transportation", directly encompassing low-carbon railway initiatives.

These principles, widely adopted in the global market, require proof of the environmentally responsible use of raised funds, as well as criteria for selection, monitoring, and transparency, which must be directly met by railway projects with proven energy efficiency and emission reductions.

In the Brazilian context, Ordinance GM/MT No. 689/2024 (Brasil, 2024b), issued by the Ministry of Transport, established an important regulatory framework by expressly recognizing that railroad projects are automatically eligible to issue infrastructure incentive debentures due to their environmental and climate efficiency. Market interest was immediate, with the railway sector raising more than double the funds of the previous year (Figure 8).

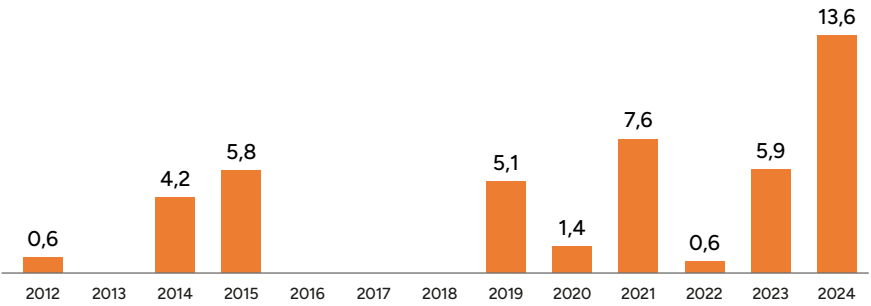



**Figure 8:** Authorized Incentivized Debentures. *Source: Ministério dos Transportes, 2025.*

This presumption of compliance with climate eligibility criteria represents a significant competitive advantage for the sector, as it reduces transaction barriers and broadens access to private financing sources and green bonds issued in the domestic market.

Therefore, in addition to its recognized performance in terms of energy efficiency and low carbon intensity, rail transport takes on an additional strategic role: that of a priority green asset for the allocation of financial resources in climate mitigation policies, as provided for in national regulatory instruments and major international sustainable finance frameworks.

## 7. DISCUSSIONS AND ANALYSIS

The synthesis of the data presented demonstrates that Brazil's railway expansion is not merely an infrastructure initiative, but a strategic element of public policy capable of fostering economic competitiveness, climate mitigation, and the attraction of private capital. Evidence from the PNL 2035 indicates that increasing the rail mode's share from 17.7% to approximately 35–40% of ton-kilometers by 2035 could reduce soybean freight costs by an average of 14 US$/t and cut up to 40 Mt CO□e/year in emissions from the freight sector.

However, the need to align rail capacity with agricultural demand still warrants critical consideration. Crop projections from Conab and the IBGE suggest a 27% increase in grain production by 2033/34. If the planned rail corridors are not built, part of this increase will continue to be transported by roads, perpetuating higher logistics costs and elevated emissions.

Another aspect that must be considered relates to the socio-environmental risks along the expansion corridors. Although rail transport has a carbon footprint up to 12 times lower than road transport, linear projects such as the FICO-FIOL corridor, cross areas that are sensitive from a biotic, physical and anthropic point of view. The harmonization of environmental permits, the creation of ecological corridors, the implementation of land-use and territorial management plans, along with effective dialogue with traditional communities and other socio-environmental safeguards, will be crucial for ensuring the "green legitimacy" of these projects.

In this context, it is essential to pay attention to the risk of greenwashing, especially when railway projects are labeled as sus-

tainable or eligible for green financing instruments without proof of environmental additionality or adherence to robust monitoring and verification criteria. Mitigating these risks requires the integration of climate safeguards into regulatory and contractual instruments, aligning railway projects with international sustainable finance frameworks and the commitments made by Brazil under the NDC and the SBCE. Otherwise, there is a risk of promoting carbon lock-in, where long-term concession contracts are finalized without clear climate guidelines, perpetuating emissions-intensive practices—such as the prolonged operation of diesel locomotives and the absence of energy efficiency targets.

Equally important are the institutional capacity and federal coordination required for the successful implementation of major rail projects, supported by effective multilevel governance. The integration of public policies at the federal level, as well as the alignment among the federal government, states, and municipalities, is essential. Previous experiences with early renovations—such as that of the Malha Paulista—demonstrate that investment targets linked to performance indicators (TKU-decarbonized, reduction of urban bottlenecks) can accelerate the delivery of results. However, the multiplicity of licensing agencies and the fragmentation of environmental responsibilities remain an institutional challenge.

In the technological sphere, the analysis confirms the strong potential for using renewable energy sources—such as hybrid locomotives and the digitalization of operations—as additional drivers for reducing emissions. The adoption of second-generation fuels in diesel-electric locomotives offers immediate benefits, but depends on clear regulatory frameworks to ensure the supply and traceability of biofuels. The study highlights the relevance of climate finance mechanisms, under which railway projects are eligible for incentive debentures, facilitating the issuance of green bonds in the domestic market.

In summary, the results underscore the robustness of the economic and environmental premises for rail transport, but also highlight that its success will depend on synergies between logistics planning, socio-environmental governance, and technological innovation.

## 8. CONCLUSIONS

The debate on logistics and climate sustainability presents Brazil with a window of opportunity to transform railway expansion into a driver of agricultural competitiveness and sectoral decarbonization. The evidence compiled in this article reinforces that the railroad offers systemic benefits, including reduced logistics costs in the soybean production chain, and that projects should be implemented with strong governance, transparency and socio-environmental standards.

However, its implementation depends on a decision-making process that goes beyond the authorization of construction projects, requiring the management and coordination of infrastructure schedules in relation to agricultural production cycles, thereby avoiding temporary bottlenecks that shift high-volume freight to more carbon-intensive modes of transport. From an academic perspective, gaps remain that warrant future investigation, such as the analysis of counterfactual scenarios of modal shift due to delays in corridors and the environmental and economic losses resulting from the failure to complete planned railway infrastructure, which will require ongoing critical monitoring of the research agenda and public development policies.

## REFERENCES

ARAUJO, C. S. C. **Freight In Brazil: An assessment and outlook for improving environmental performance**, International Council on Clean Transportation, fev 2021. Disponível em: <https://theicct.org/wp-content/uploads/2021/12/brazil-freight-assessed-sept21.pdf>. Acesso em: 3 jul. 2025

BARTHOLOMEU, D. B.; ROCHA, F. V.; PÉRA, T. G.; CAIXETA FILHO, J. V. **Postharvest losses in the wheat logistics chain: a Brazilian case study**. Journal of Agricultural Science and Technology B, v. 6, p. 321-329, 2016. Disponível em: < https://www.researchgate.net/publication/317951512_Postharvest_Losses_in_the_Wheat_Logistics_Chain_A_Brazilian_Case_Study >. Acesso em: 13 out. 2025

BNB, ETENE **Sector Notebook**. Technical Office of Economic Studies of the Northeast - ETENE, Banco do Nordeste, Year 9, No. 363, Nov, 2024

BRAZIL, National Logistics Plan - PNL 2035, **Executive Report. Planning and Logistics Company - EPL, 2021**, Available at: <https://ontl.infrasa.gov.br/wp-content/uploads/2021/10/>. Accessed on: 4 jul. 2025

BRAZIL. **New Nationally Determined Contribution**. Brasília, 2024a. Available at: <https://www.gov.br/mma/pt-br/ndc-versao-em-portugues.pdf/>. Accessed on: 8 jul. 2025

BRAZIL. **Ordinance GM/MT No. 689, of February 15, 2024**. issuance of incentivized and infrastructure debentures for priority projects in the road and rail sectors. Federal Official Gazette, Brasília, DF, 2024b.

CEPEA, **GDP of Brazilian Agribusiness**. Center for Advanced Studies in Applied Economics, Department of Economics, Administration and Sociology. Esalq/USP. Available at: <https://www.cepea.org.br/br/pib-do-agronegocio-brasileiro.aspx>. Accessed on 7 Jul. 2025

CBI, **Climate Bonds Standard: globally recognised, Paris-aligned Certification, of debt instruments, entities and assets using robust, science-based methodologies**. version 4.2. 2024, Disponível em: <www.climatebonds.net/files/documents/publications/Climate-Bonds_Climate-Bonds-Standard_V4-2_Jun-2024.pdf>. Acesso em 7 jul. 2025

CEBDS, **Transport Coalition: how to make the transport sector an active contributor to the reduction of Brazilian emissions**. Brazilian Business Council for Sustainable Development. Available at: <https://cebds.org/publicacoes/coalizao-dos-transportes-como-tornar-o-setor-de-transportes-um-contribuidor-ativo-para-a-reducao-das-emissoes-brasileiras/>. Accessed on: 10 jul. 2025

CLIMATE TRACE. **Faster, more-effective decarbonization starts with detailed knowledge of emissions sources**. Disponível em: <https://climatetrace.org/sectors>, Acesso em: 8 jul 2025

CONAB, **Monitoring the Brazilian harvest: Grains**. 2024/25 harvest. 2nd Survey. v. 12, nov. 2024. Available at: https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/graos. Accessed on: 14 Jul 2024

CNT. CNT **Highway Survey 2024: management report**. National Transport Confederation, Brasília: CNT; SEST SENAT; ITL, 2024. 224 p. ISBN 978-85-68865-23-1 (digital). Available at: <https://pesquisarodovias.cnt.org.br>. Accessed on: 13 Oct 2025.

GIL, A. C. **Métodos e Técnicas de Pesquisa Social**. Editora Atlas, 6th edition, São Paulo, 2008

GHISOLFI, V.; TAVASSZY, L. A.; CORREIA, G. H. A. R.; CHAVES, G. de L. D.; RIBEIRO, G. M., **Dynamics of freight transport decarbonization: A simulation study for Brazil, Transportation Research Part D: Transport and Environment**, Volume 127, February 2024. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1361920923004170>. Acessoem: 10 jul. 2025

GTR, Grain Transportation Report. **Agricultural Marketing Service**. US Department of Agriculture, july 3 2025. Disponível em: <https://www.ams.usda.gov/services/transportation-analysis/gtr>. Acesso em 5 jul. 2025.

IEA(a) Transport. **International Energy Agency**. Available at: <https://www.iea.org/energy-system/transport#tracking>. Accessed on: 9 jul. 2025

IEA (b) **Net Zero Emissionsby 2050 Scenario (NZE)**. Global Energy and Climate Model. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/global-energy-and-climate-model/net-zero-emissions-by-2050-scenario-nze>. Acesso em: 9 jul. 2025

IBGE (a), **Systematic Survey of Agricultural Production**. Soybeans. Available at <https://sidra.ibge.gov.br/tabela/6588#resultado>. Accessed on 7 mar. 2024

IBGE (b) **IBGE forecasts a harvest of 332.6 million tons for 2025**. Available at: <https://agenciadenoticias.ibge.gov.br/agencia-sala-de-imprensa/2013-agencia-de-noticias/

releases/43684-em-maio-ibge-preve-safra-de-332-6-milhoes-de-toneladas-para-2025>. Accessed on 6jul 2025

COOPER, C.; KAMAKATÉ, F.; REINHART, T.; KROMER, M., WILSON, R. **Reducing fuel consumption and CO2 emissions from heavy-duty long-haul combination trucks**, Report, ICCT, 2009

HOLLER BRANCO, J. E.; BARTHOLOMEU, D. B.; ALVES JÚNIOR, P. N.; CAIXETA FILHO, J. V. **Evaluation of the economic and environmental impacts from the addition of new railways to the brazilian's transportation network: An application of a network equilibrium model**. Transport Policy 124 (2022) 61–69.

OEC, Soybeans (HS: 1201) **Product Trade, Exporters and Importers. The Observatory of Economic Complexity**. Available at: <https://oec.world/en/profile/hs/soybeans>. Accessed on 5 Jul. 2025

OLIVEIRA, M. M., **How to do qualitative research**. Vozes, Petrópolis, 2007

PRESSINOTT, F. **Shipping soybeans to China mora costhy for Brazil**. National Association of Cereal Exporters. Valor Internacional. 14 Nov 2024. Available at: <https://valorinternational.globo.com/agribusiness/news/2024/11/14/shipping-soybeans-to-china-more-costly-for-brazil.ghtml >, Accessed on: 14 Oct 2025

SALIN, D.L, SOMWARU, A. **The Impact of Brazil's Infrastructure and Transportation Costs on U.S. Soybean Market Share: An Updated Analysis From 1992-2019**. U.S. Department of Agriculture, Agricultural Marketing Service. Nov 2020. Disponível em:<http://dx.doi.org/10.9752/TS290.11-2020>. Acesso em: 4 jul. 2025

SALIN, D. **Brazil Soybean Transportation**. Washington, DC. U.S. Department of Agriculture, Agricultural Marketing Service. Ago 2025. Disponível em <http://dx.doi.org/10.9752/TS052.08-2025>. Acesso em: 13 out 2025

SEEG, SEEG Data. **General Table. Greenhouse Gas Emissions and Removals Estimation System**. 2024. Available at: <https://seeg.eco.br/dados/>. Accessed on: 9 jul. 2025

WANG, ZHAN; MARTHA JR., GERALDO B.; LIU, JING; LIMA, CICERO Z.; HERTEL, THOMAS W. **Planned expansion of transportation infrastructure in Brazil has implications for the pattern of agricultural Productions and carbon emissions**. Science of The Total Environment, 928 (2024) 172434.

12

# AVALIAÇÃO DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTE RESILIENTE: A INTEGRAÇÃO DE SOLUÇÕES BASEADAS NA NATUREZA PARA ENFRENTAR DESASTRES CLIMÁTICOS E PROMOVER SUSTENTABILIDADE

LUIZA CARVALHO TEREZA

## RESUMO:

A crescente incidência de desastres naturais no mundo, especialmente devido às mudanças climáticas, torna urgente a necessidade de se pensar em infraestruturas resilientes. Em 2023, aproximadamente 400 eventos extremos causaram cerca de 87 mil mortes e perdas econômicas de US$ 202,7 bilhões, evidenciando a importância de sistemas de infraestrutura adaptativos. A infraestrutura de transporte desempenha um papel estratégico, pois a sua capacidade de recuperação rápida é essencial para a continuidade dos serviços essenciais, especialmente em cenários de desastres. A resiliência dessas infraestruturas depende de sua capacidade de resistir, se adaptar e se recuperar, o que envolve não apenas engenharia convencional, mas também Soluções Baseadas na Natureza (SbN). Essas soluções, como a revegetação de taludes e a criação de corredores verdes, podem melhorar a sustentabilidade e a robustez das infraestruturas. No Brasil, onde desastres climáticos têm causado danos crescentes, a adaptação às mudanças climáticas e a integração de SbN no planejamento de infraestrutura são possibilidades de estratégias para mitigar riscos e fortalecer a resiliência das redes de transporte, garantindo benefícios ambientais, sociais e econômicos.

DOI: 10.66949/p1t7w5n8

**Palavras-chave**

Infraestrutura resiliente, soluções baseadas na natureza (SbN), sistemas de transportes, WIPW.

## INTRODUÇÃO

O mundo enfrenta um cenário de mudanças climáticas cada vez mais severas, marcado pelo aumento da frequência e da intensidade de eventos extremos. Apenas em 2023, segundo o Banco de Dados Internacional de Desastres, foram registrados aproximadamente 400 eventos naturais extremos, que resultaram em cerca de 87 mil mortes e perdas econômicas superiores a US$ 202,7 bilhões. Esses números evidenciam não apenas a gravidade da crise climática, mas também a vulnerabilidade estrutural de cidades e regiões cujas infraestruturas foram projetadas para condições climáticas que já não correspondem à realidade atual. A crise climática não se revela apenas na magnitude dos danos, mas na incapacidade de muitas regiões de prevenir, resistir e se recuperar dos impactos.

No Brasil, esse cenário é particularmente crítico. Entre 2020 e 2023, a média anual de desastres climáticos dobrou, passando de 2.073 para 4.077 eventos (Development Aid, 2024). Entre 1995 e 2023, os prejuízos acumulados somaram US$ 107 bilhões (AON, 2024). As enchentes no Rio Grande do Sul, entre abril e maio de 2024, são um exemplo emblemático desse processo: foram 182 mortes, perdas estimadas em cerca de US$ 5 bilhões e a afetação de 94,3% das atividades econômicas do estado (Fiergs, 2024). Para além dos danos materiais, o evento expôs a fragilidade dos sistemas de mobilidade, logística e abastecimento, revelando como a infraestrutura é elemento central para a segurança da população.

A infraestrutura de transporte é reconhecida como um dos dezesseis sistemas críticos essenciais ao funcionamento da sociedade contemporânea (US Department Of Homeland Security, 2013). Quando ela é interrompida, os custos não se limitam à reconstrução física: há custos indiretos expressivos, como a paralisação de

atividades econômicas, o isolamento de comunidades e a interrupção no acesso a serviços essenciais. O tempo de recuperação de uma região afetada está diretamente relacionado à funcionalidade da rede de transporte: uma malha viária comprometida retarda o socorro, dificulta o abastecimento e pode agravar crises humanitárias. Em situações extremas, a interrupção da mobilidade pode significar a diferença entre um desastre controlável e uma tragédia prolongada. Diante desse cenário, a resiliência da infraestrutura se torna uma exigência estratégica.

A literatura define resiliência como a capacidade de um sistema resistir, se adaptar e se recuperar perante choques externos. No campo da infraestrutura civil, essa capacidade é sintetizada em quatro atributos fundamentais, segundo Zhang e Wang, 2016: (i) robustez: habilidade de manter níveis mínimos de serviço mesmo diante de impactos; (ii) rapidez: tempo necessário para restabelecer a operação após um evento; (iii) redundância: existência de rotas ou sistemas alternativos capazes de suprir funções críticas; (iv) capacidade de mobilização de recursos: habilidade institucional de diagnosticar problemas e agir com eficiência.

No entanto, soluções tradicionais de engenharia, centradas em obras rígidas e impermeáveis, vêm se mostrando limitadas frente à intensificação dos eventos climáticos. Historicamente, a gestão da drenagem em infraestruturas lineares orientou-se pelo princípio de acelerar o escoamento superficial, conduzindo a água rapidamente para sistemas de macrodrenagem ou cursos d'água adjacentes. Entretanto, alterações nos regimes de precipitação, aumento da impermeabilização e maior frequência de eventos extremos evidenciam a necessidade de rever esse paradigma, incorporando mecanismos capazes de reter, regular e infiltrar a água no próprio território.

Nesse contexto, a microdrenagem distribuída — que envolve dispositivos como valas drenantes vegetadas, trincheiras de infiltração, barreiras filtrantes e pavimentos permeáveis de suporte técnico — vem se consolidando como estratégia essencial para promover uma dinâmica hidrológica mais equilibrada, reduzindo picos de vazão e aliviando a pressão sobre estruturas de grande porte. Estudos técnicos promovidos por instituições como a *Environmental*

*Protection Agency* (EPA) demonstram que tais sistemas são eficazes na redução de volume de escoamento e na recomposição de processos de infiltração que caracterizam ambientes naturais.

É nesse horizonte que ganham relevância as Soluções Baseadas na Natureza (SbN), entendidas como abordagens projetuais e operacionais que emulam funções ecossistêmicas, integrando solo, vegetação e água ao desempenho da infraestrutura.

No caso da infraestrutura viária, as SbN incluem a revegetação técnica e estabilização de taludes com espécies nativas, a implantação de valas vegetadas e biorretenções lineares ao longo do corpo estradal, a recuperação e proteção de áreas úmidas adjacentes e a adoção de dispositivos de infiltração distribuída como parte da plataforma de drenagem rodoviária. Essas soluções promovem a redução do escoamento superficial, a mitigação de processos erosivos, a modulação das cheias e o aumento da resiliência geotécnica, contribuindo para prolongar a vida útil da infraestrutura e melhorar sua interação com o território.

A adoção dessas estratégias representa uma transição paradigmática: da infraestrutura concebida como elemento dissociado do meio físico para um modelo híbrido e adaptativo, no qual a água passa a ser tratada como variável estruturante, não como subproduto indesejado. A implementação efetiva das SbN exige coordenação interinstitucional, integração entre engenharia civil, planejamento territorial e gestão ambiental, além de ajustes normativos e metodológicos, especialmente no âmbito de projetos, manutenção e contratação pública. Nesse sentido, construir e gerir infraestruturas resilientes não constitui apenas resposta à crise climática, mas condição para assegurar funcionalidade, segurança, continuidade de serviços e desenvolvimento sustentável, reconhecendo que as redes de transporte sustentam não apenas fluxos materiais, mas vidas, economias e coesões territoriais.

## APRESENTAÇÃO DO OBJETO: SOLUÇÕES BASEADAS NA NATUREZA

As SbN têm se mostrado uma alternativa eficaz para enfrentar os desafios impostos pelas mudanças climáticas e pelos desas-

tres naturais, especialmente na construção e manutenção de infraestruturas resilientes. Embora a adoção de SbN seja ainda recente, alguns países têm se destacado na implementação dessas soluções, particularmente no setor de infraestrutura ferroviária, onde o Reino Unido é considerado um pioneiro. Estudos recentes indicam que o Reino Unido tem sido um dos países líderes na adoção de SbN, seguido por Itália, Espanha e França, que implementaram diversas iniciativas em suas infraestruturas, como no caso de regiões alpinas no norte da Itália e áreas específicas da França e da Espanha.

Esses países utilizam SbN de diversas formas, adaptadas aos seus climas e tipos de infraestrutura. No entanto, embora exemplos de SbN aplicadas em países existam, não são tão comuns. A maioria da literatura e dos estudos de caso sobre SbN provém de países da Europa, mas a aplicação de soluções baseadas na natureza está se expandindo à medida que mais evidências sobre sua eficácia se tornam disponíveis. As Soluções Baseadas na Natureza podem ser classificadas em três abordagens principais, conforme identificado em estudos recentes, (Capobianco, 2024):

**- Abordagens Verdes** (*Green Approaches*): envolvem o uso de vegetação, como a plantação de árvores e o reforço da cobertura vegetal, para estabilizar o solo, reduzir deslizamentos de terra e melhorar a drenagem, ajudando a prevenir inundações e erosão. Exemplos incluem o uso de florestas de proteção ao longo de estradas ou ferrovias para reduzir o risco de deslizamentos.

**- Abordagens Azuis** (*Blue Approaches*): relacionadas a soluções baseadas na água, como áreas de retenção de água e pântanos construídos, que ajudam a reduzir os riscos de inundações ao permitir a absorção e o armazenamento de água das chuvas, protegendo as infraestruturas adjacentes. Essas abordagens são particularmente eficazes em regiões suscetíveis a inundações frequentes.

**- Abordagens Híbridas** (*Hybrid Approaches*): combinação das abordagens verde e azul, como o uso de vegetação em conjunto com sistemas de drenagem natural, que oferecem uma solução mais robusta e adaptada para áreas vulneráveis a múltiplos riscos climáticos, como inundações e deslizamentos.

Essas práticas podem ser implementadas em diferentes escalas, desde objetos individuais até redes nacionais, com a possi-

bilidade de *retrofit*, novas construções ou manutenção preventiva. As estratégias podem ser categorizadas como prevenção, que visa eliminar ou reduzir a vulnerabilidade, ou atitude proativa, que foca na redução do risco e na adaptação das infraestruturas existentes.

Além disso, as SbN têm um impacto direto e indireto nas infraestruturas lineares, como rodovias e ferrovias. Enquanto muitas dessas soluções são implementadas nas áreas ao redor das infraestruturas (impacto indireto), elas ainda geram benefícios substanciais ao reduzir os riscos de desastres naturais, como deslizamentos de terra e inundações, que afetam a funcionalidade e segurança dessas infraestruturas. Por exemplo, florestas de proteção e pântanos construídos podem reduzir significativamente os riscos para as infraestruturas, melhorando a resiliência de toda a rede de transporte.

## Estudo de Caso 1: Bioengenharia em Leizaran, Espanha

Quando o conceito de SbN é abordado, é essencial integrar a disciplina de Bioengenharia de Solo e Água (*Soil and Water Bioengineering* – SWB). O SWB combina tecnologia e biologia, utilizando plantas nativas e comunidades vegetais como materiais vivos de construção para resolver problemas de erosão e conservação. O objetivo central do SWB é proteger infraestruturas e usos do solo em cenários de conflito entre necessidades opostas: as exigências de uso da terra para atividades e infraestruturas e a necessidade dos sistemas naturais por espaço para seu desenvolvimento (Casabianco *et al*, 2024).

Localizado no extremo norte da Península Ibérica, o País Basco é uma região marcada por um relevo montanhoso e por uma costa atlântica úmida, caracterizada por alta pluviosidade anual e variações abruptas de altitude em curtas distâncias. Essa combinação de fatores orográficos e climatológicos favorece a ocorrência de processos erosivos e movimentos de massa, especialmente em áreas de infraestrutura viária construídas em encostas íngremes. As cadeias montanhosas bascas, recobertas por solos muitas vezes rasos e por vegetação atlântica temperada, tornam a estabilidade de taludes um desafio permanente para a engenharia local.

Além disso, a urbanização densa em vales estreitos e a expansão de estradas e ferrovias através de terrenos complexos intensificam a sensibilidade da região a deslizamentos, exigindo soluções de estabilização que conciliem segurança, durabilidade e integração com o meio físico existente.

Nesse contexto, no País Basco, na Espanha, onde deslizamentos de terra são comuns devido justamente a essas condições orográficas e climatológicas, as Soluções Baseadas na Natureza (SbN) têm sido preferidas às soluções tradicionais de engenharia nos últimos quinze anos (Figura 1). O Departamento de Infraestrutura Rodoviária local solicitou diversos projetos técnicos ao longo de taludes rodoviários, com destaque para técnicas como muros de gabião naturais e drenagem superficial utilizando drenos naturais, que são soluções eficazes para estabilização de taludes e proteção contra erosão. Essas técnicas, além de restaurarem a morfologia dos taludes, promovem a recuperação do gradiente natural e da vegetação, reforçando a integração entre infraestrutura viária e paisagem.

**Figura 1:** Exemplo de muros de gabião natural ao longo de uma estrada montanhosa em Leizaran, Espanha: a) durante a construção, e b) após o estabelecimento das plantas. *Fonte: Capobianco et al., 2024.*

Em Santa Elena, na Espanha, foi implementada uma solução interessante para combater a erosão em uma crista glacial, que causava o deslizamento de detritos e pedras grandes na estrada: foi criado um sistema de terraços ao longo do talude (Figura 2). A base da estrutura foi formada por uma parede de alvenaria seca de 5 metros de altura, para trazer estabilidade.

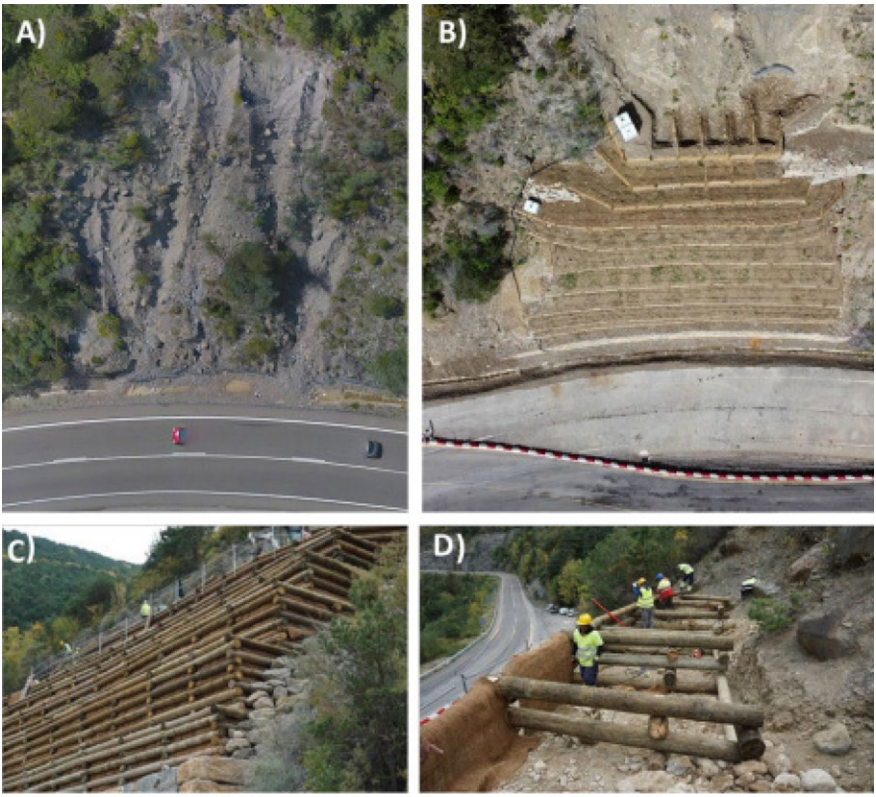



**Figura 2:** a) Foto aérea do talude antes da intervenção, b) Durante a construção c) Detalhe das terras de madeira, d) Construção dos gabiões de madeira que sustentam os terraços. *Fonte: Capobianco et al., 2024.*

Acima da base de alvenaria, os dez terraços restantes foram construídos com troncos de madeira, formando estruturas conhecidas como gabiões de madeira — ou *Cribwall Krainer*. Esses troncos foram empilhados e preenchidos com sedimentos locais, proporcionando uma forma mais natural e sustentável de estabilizar o solo e impedir que grandes pedras e detritos deslizassem para a estrada.

Para garantir que a vegetação pudesse se estabelecer e ajudar na estabilização do solo, foi colocada uma camada de 10 cm de solo orgânico, permitindo o plantio de arbustos. Esses arbustos, com o tempo, ajudarão a fortalecer a área, formando raízes que contribuem para a fixação do solo. Além disso, foram feitos buracos

de 1 metro de profundidade a cada 3 metros ao longo dos terraços preenchidos com solo orgânico, para plantar árvores maiores. Essas árvores, com raízes profundas, ajudarão a estabilizar ainda mais a encosta a longo prazo.

O objetivo principal dessa estrutura é que, ao longo de 20 a 30 anos, à medida que os troncos de madeira se decomponham, a vegetação assuma a função de estabilizar a encosta de forma sustentável. Essa abordagem tem mostrado bons resultados, não apenas em termos de proteção contra a erosão, mas também por contribuir para uma infraestrutura resiliente, que se adapta ao longo do tempo. Ao integrar a engenharia natural, essa solução permite que o sistema se recupere de maneira autossustentável, com a vegetação desempenhando um papel crucial na manutenção da estabilidade do talude à medida em que a madeira se degrada.

A técnica mencionada acima demonstra a eficácia das SbN quando integradas às infraestruturas cinzas, oferecendo uma alternativa sustentável e de longo prazo para a estabilização de taludes e a proteção de infraestruturas de transporte. Essa abordagem híbrida alia desempenho técnico e equilíbrio ecológico, contribuindo para a redução de riscos geotécnicos e a adaptação às mudanças climáticas. Existem projetos de referência internacionais que podem servir como projetos pilotos para aplicação em contextos brasileiros, especialmente em rodovias e ferrovias com recorrência de instabilidades em taludes, oferecendo caminhos viáveis para a replicação em larga escala.

### Estudo de Caso 2:
### San Luis de Chillogallo, Equador

A região andina se caracteriza por condições geomorfológicas complexas, com encostas íngremes, solos jovens de origem vulcânica, altos índices pluviométricos e forte dinâmica de erosão superficial. Esses fatores conferem especial vulnerabilidade a infraestruturas lineares, como rodovias, que frequentemente acompanham cortes e aterros sujeitos à instabilidade.

Um caso exemplar dessa abordagem é o projeto de estabilização de talude em San Luis de Chillogallo, situado na zona sul da

Região Metropolitana de Quito, em área de transição entre tecido urbano denso e encostas rurais (Maxwald *et al.*, 2020). O talude em questão apresentava erosão laminar progressiva, formação de ravinas superficiais e indícios de instabilidade rasa, agravados por intensa precipitação sazonal, solos vulcânicos altamente suscetíveis ao desagregamento, ausência de cobertura vegetal consolidada e alteração do regime hidrológico decorrente da expansão urbana.

Esses processos ameaçavam a estabilidade da plataforma viária adjacente e comprometiam a segurança de circulação, especialmente durante eventos de chuva intensa. Intervenções convencionais de contenção exigiriam estruturas rígidas de grande porte, com alto custo financeiro e reduzido potencial de integração paisagística.

A intervenção (Figura 3) adotou um sistema híbrido de bioengenharia, combinando elementos estruturais biodegradáveis com vegetação viva, de modo que a estabilidade evoluísse ao longo do tempo. O arranjo técnico consistiu em: *cribwalls* de madeira (estruturas reticuladas que conferem suporte inicial ao talude), palissadas vivas, constituídas por estacas vegetativas capazes de enraizar e reforçar o terreno, transplantação de tapetes de gramínea nativa (*sod slabs*), favorecendo cobertura imediata do solo e reduzindo erosão superficial, ajustes de microdrenagem distribuídas ao longo do corpo do talude, controlando a circulação interna da água sem expulsá-la rapidamente do sistema.

**Figura 3:** SbN em San Luis de Chillogallo, logo após a finalização, em 2012, e em 2018, durante monitoramento. *Fonte: (Maxwald et al., 2020).*

O sistema foi planejado segundo o princípio de substituição progressiva da função estrutural: no curto prazo, a estabilidade do talude seria garantida principalmente pela estrutura em madeira e pela geometria do arranjo, assegurando suporte imediato à encosta; no médio e longo prazo, à medida que a madeira se decompusesse, esperava-se que o desenvolvimento radicular da vegetação implantada assumisse gradativamente o papel de reforço mecânico do solo, consolidando a estabilidade de forma contínua e adaptativa.

Esses resultados demonstram que a solução não apenas estabilizou o talude, mas reorganizou seu funcionamento hidrológico e mecânico, promovendo um sistema de suporte autossustentado ao longo do tempo.

## ESTRATÉGIAS PARA AVALIAÇÃO DA RESILIÊNCIA DE INFRAESTRUTURAS

Dando continuidade à discussão sobre como garantir a operação contínua das infraestruturas diante de desastres naturais, torna-se essencial adotar estratégias eficazes de avaliação da resiliência. Em um cenário marcado por mudanças climáticas cada vez mais intensas e imprevisíveis, essas avaliações são fundamentais para identificar vulnerabilidades, orientar intervenções preventivas e assegurar que os sistemas críticos mantenham sua funcionalidade, mesmo em condições adversas.

Nesse contexto, uma ferramenta útil para essa análise é o WIPW (*Weighted Importance of Performance Weights*), uma metodologia quantitativa baseada na teoria de grafos que mede a capacidade de desempenho de uma rede após um evento extremo, desenvolvida por Zhang e Wang, em 2016. O WIPW integra variáveis críticas — como a topologia da rede, a redundância de caminhos alternativos, os padrões de tráfego e a probabilidade de falha de componentes-chave, como pontes e rodovias, além da localização de centros de resposta a emergências.

A grande vantagem dessa abordagem é sua capacidade de fornecer uma visão detalhada e sistemática de como uma rede de transporte pode ser afetada por desastres naturais, identificando

os pontos vulneráveis e as oportunidades para melhorar a resiliência da infraestrutura. Ao integrar o WIPW no planejamento de infraestruturas, torna-se possível quantificar o impacto potencial de diferentes cenários de falha, comparar alternativas de mitigação de risco e tomar decisões informadas sobre quais medidas adotar para aumentar a capacidade de adaptação da rede.

Isso não apenas ajuda a otimizar o desempenho da infraestrutura durante uma crise, mas também permite um planejamento mais eficiente para novos projetos, considerando tanto a eficiência operacional quanto a sustentabilidade a longo prazo.

A seguir, são apresentadas as variáveis críticas consideradas neste modelo de avaliação de resiliência, juntamente com as práticas de SbN que poderiam ser aplicadas em cada etapa:

| Componente Avaliado (WIPW) | Objetivo | Intervenções Possíveis | Exemplos de Soluções Baseadas na Natureza (SbN) |
|---|---|---|---|
| **Aumento da confiabilidade de componentes críticos (retrofit)** | Reduzir a probabilidade de falha de pontes, viadutos e taludes vulneráveis | Reforço estrutural e estabilização local | Revegetação de taludes; bioengenharia; jardins de chuva; biorretenção para drenagem |
| **Otimização da topologia da rede (novas conexões / rotas alternativas)** | Garantir redundância e rotas seguras em caso de interrupção | Criação de vias alternativas ou reforço de ligações secundárias | Corredores verdes; pavimentos permeáveis; preservação/ restauração de áreas úmidas |
| **Alteração de padrões de tráfego (gestão operacional)** | Manter fluxo e acessibilidade durante eventos extremos | Rotas preferenciais, reconfiguração temporária da malha, controle de acessos | (SbN não se aplica diretamente — trata-se de medida operacional) |
| **Localização estratégica de centros de resposta** | Reduzir tempo de resposta e assegurar acesso contínuo aos serviços de emergência | Posicionamento de bases logísticas e unidades críticas | Criação de áreas verdes de amortecimento e retenção de água que protegem instalações |

Além do WIPW, que permite avaliar a resiliência de redes de transporte e outras infraestruturas, o uso de Sistemas de Informação Geográfica (GIS) também se apresenta como uma solução eficaz para identificar e analisar áreas suscetíveis a desas-

tres naturais, como deslizamentos de terra, inundações e outros riscos climáticos.

O GIS facilita o mapeamento de fatores como suscetibilidade ao deslizamento de terra, intensidade pluviométrica e condições do terreno, permitindo que as infraestruturas sejam avaliadas com base nas características locais e nos riscos enfrentados. Com essas ferramentas, é possível priorizar as áreas mais vulneráveis e orientar a implementação de Soluções Baseadas na Natureza (SbN) para mitigar esses riscos.

Para maximizar a eficácia dessas metodologias, é essencial contar com bases de dados confiáveis e atualizadas em GIS, que forneçam informações precisas e detalhadas para a tomada de decisões, garantindo que as intervenções sejam direcionadas de forma estratégica e eficiente. O uso conjunto do WIPW e do GIS fortalece o planejamento e a gestão de infraestruturas resilientes, tornando as soluções mais adaptativas e sustentáveis diante dos desafios climáticos.

## DISCUSSÃO

A adoção de Soluções Baseadas na Natureza (SbN) no Brasil representa um passo crucial para a construção de infraestruturas resilientes diante de desafios climáticos crescentes, como inundações, erosão e deslizamentos de terra. Embora a aplicação de SbN em grandes projetos de infraestrutura no Brasil ainda esteja em um estágio inicial, os resultados promissores observados em outros países indicam que estas soluções podem ser uma alternativa eficaz para mitigar riscos e adaptar a infraestrutura à realidade das mudanças climáticas. No entanto, para que as SbN sejam efetivamente implementadas no país, é necessário superar uma série de barreiras, incluindo a necessidade de aprimoramento técnico, adequação de regulamentações e a necessidade de maior colaboração entre diferentes setores.

Uma das vantagens chave das SbN é sua capacidade de atuar não apenas como soluções isoladas, mas como parte de um sistema integrado de resiliência. Ao incorporar práticas como a plantação de vegetação para estabilizar solos ou sistemas de drenagem

sustentável para prevenir inundações, essas abordagens oferecem benefícios múltiplos, como a preservação de ecossistemas locais, a proteção da biodiversidade e a redução de custos com manutenção de infraestruturas convencionais. Por exemplo, em áreas de risco de deslizamentos de terra, florestas de proteção podem ser estabelecidas para reduzir a erosão e, ao mesmo tempo, melhorar a qualidade do solo e da água, trazendo ganhos para a infraestrutura e para o ambiente.

Além disso, ao integrar SbN no planejamento de infraestruturas de transporte, é possível criar redes mais adaptáveis. No Brasil, onde a infraestrutura rodoviária e ferroviária enfrenta constantes desafios devido à vulnerabilidade a desastres naturais, as SbN oferecem uma solução que vai além da simples recuperação pós-desastre. Elas oferecem estratégias preventivas, que visam reduzir os danos antes que ocorram, o que é essencial para garantir a continuidade dos serviços e minimizar os custos com reparos e reconstrução. A drenagem sustentável, por exemplo, pode ser instalada ao longo das rodovias para ajudar a absorver a água das chuvas intensas, reduzindo o risco de inundações e melhorando a resiliência das vias.

Entretanto, para que as SbN se tornem uma prática comum no Brasil, é fundamental um planejamento proativo. O país precisa adotar uma abordagem integrada, considerando as mudanças climáticas no processo de planejamento e implementação de infraestruturas. Isso envolve a identificação de áreas vulneráveis, a adaptação das políticas públicas e a criação de incentivos para o uso de SbN, como a preservação de áreas verdes e o reforço de taludes naturais.

Nesse processo, o uso de ferramentas de avaliação e de geotecnologias, como SIG, desempenha um papel estratégico. Elas permitem mapear riscos com maior precisão, monitorar o desempenho das intervenções e adaptar as soluções conforme as especificidades territoriais. Essa abordagem precisa ser flexível e sensível às realidades regionais, possibilitando a aplicação de SbN em desde o semiárido nordestino, marcado por secas prolongadas, até as áreas montanhosas do Sudeste, vulneráveis a deslizamentos e inundações.

Em Minas Gerais, a SEINFRA-MG (Secretaria de Estado de Infraestrutura, Mobilidade e Parcerias de Minas Gerais) e o DER-MG (Departamento de Estradas de Rodagem do Estado de Minas Gerais) têm adotado práticas que refletem essa abordagem integrada. Por meio do Observatório do DER-MG e de coleta de dados em campo, o estado monitora condições geotécnicas das rodovias, acidentes e falhas estruturais, complementadas por informações colaborativas de usuários de aplicativos como o *Waze*, um sistema de navegação que permite aos motoristas reportarem em tempo real condições das vias, como buracos, obras ou congestionamentos. Esses dados primários, aliados a análises geoespaciais, permitem uma visão detalhada dos riscos e embasam decisões preventivas, antecipando intervenções e fortalecendo a resiliência das infraestruturas.

Para que essas análises sejam ainda mais robustas, é fundamental consolidar os dados em uma base nacional única, que permita aos estados compartilharem informações consistentes, evitando dispersão de dados e garantindo decisões estratégicas baseadas em evidências confiáveis. Essa base unificada poderia incluir não apenas indicadores de eventos extremos, como inundações e deslizamentos, mas também informações geotécnicas detalhadas e registros de períodos de seca, oferecendo uma visão integrada dos riscos climáticos e geológicos do país.

O aprofundamento sobre os benefícios e a efetividade das SbN é um desafio a ser enfrentado. Para superar isso, é necessário avaliar as iniciativas de países como o Reino Unido, onde SbN foram aplicadas com sucesso em infraestruturas ferroviárias, ou França e Espanha, que integraram abordagens naturais para proteger suas redes de transporte. Investir em capacitação técnica e educação ambiental, além de compartilhar experiências e lições aprendidas, é crucial para garantir que SbN sejam vistas como uma solução válida e eficaz. A implementação de pilotos de SbN em trechos específicos de rodovias ou ferrovias pode ser um passo inicial importante para testar a viabilidade dessas soluções em diferentes contextos climáticos e geográficos.

Além disso, a colaboração com stakeholders locais, como agricultores, proprietários de terras e comunidades locais, pode ser um fator chave para o sucesso das SbN. Muitas dessas soluções

dependem do uso de áreas adjacentes às infraestruturas, e a cooperação será necessária para viabilizar sua implementação. O incentivo a parcerias público-privadas e a criação de incentivos financeiros podem ajudar a viabilizar projetos que integrem SbN com infraestrutura tradicional.

Por fim, as SbN não são uma solução única, mas um complemento às infraestruturas convencionais. Em alguns casos, uma abordagem híbrida, que combine estruturas convencionais com soluções baseadas na natureza, pode ser a mais eficiente. Esse tipo de abordagem permite aproveitar as vantagens das SbN, ao mesmo tempo em que garante a robustez e a durabilidade das infraestruturas tradicionais, oferecendo um equilíbrio entre sustentabilidade e eficiência técnica.

## CONCLUSÃO

A persistente insuficiência de investimentos em prevenção evidencia uma falha estrutural na forma como o Brasil e grande parte do mundo encaram o risco de desastres. A elevação expressiva dos custos econômicos das tragédias climáticas nos últimos anos não é um fenômeno isolado, mas o sintoma de um modelo de gestão que privilegia a resposta emergencial e corretiva em detrimento do planejamento estratégico e antecipatório. Os US$ 6,4 bilhões em perdas registrados no Brasil apenas entre janeiro e setembro de 2024 (AON, 2024) ilustram um ciclo paradoxal: quanto menos se investe em prevenção, maior se torna o gasto com reconstrução, aprofundando vulnerabilidades e desigualdades territoriais ao invés de repará-las.

A baixa capacidade institucional e orçamentária observada em grande parte dos municípios revela uma assimetria crítica entre a escala dos desafios e os instrumentos de gestão existentes. Sem financiamento estruturado e contínuo, a política de prevenção torna-se frágil, momentânea e condicionada a decretos de emergência, que tratam os efeitos dos desastres, mas não suas causas socioambientais.

Nesse cenário, a transição para uma abordagem preventiva e resiliente não é apenas técnica, mas também política, exigindo

reorganização de prioridades, disputa de recursos e transformação de modelos de desenvolvimento. Assim, a resiliência das infraestruturas de transporte torna-se central. Infraestruturas resilientes não significam apenas estruturas mais resistentes, mas sistemas capazes de se adaptar, se recuperar rapidamente e operar de forma integrada ao território. É aqui que as SbN assumem um papel estratégico. Mais do que alternativas "verdes", elas representam uma mudança de paradigma: reconhecer a natureza como infraestrutura funcional, capaz de reduzir riscos hidrológicos e geotécnicos, ampliar a vida útil dos ativos e gerar benefícios sociais, ambientais e econômicos simultaneamente.

No entanto, para que essa transição se traduza em decisões práticas e eficientes, é fundamental incorporar ferramentas analíticas robustas. Modelos como o WIPW permitem avaliar vulnerabilidades e priorizar intervenções em trechos críticos de redes de transporte, racionalizando investimentos em cenários de restrição fiscal. Da mesma forma, o uso de SIG possibilita identificar áreas suscetíveis a deslizamentos, simular impactos climáticos futuros e integrar dados ambientais, estruturais e sociais, orientando decisões territorialmente coerentes e preventivas.

Assim, investir em resiliência de infraestrutura não é um custo adicional, é uma condição para a proteção da vida, da justiça territorial e da continuidade do desenvolvimento. Em um país marcado por grande diversidade territorial e profundas desigualdades socioespaciais, a adoção de estratégias que combinem planejamento preventivo, SbN, inteligência territorial e modelos de priorização, como o WIPW, representa não apenas uma resposta técnica ao agravamento da crise climática, mas um compromisso ético com a construção de territórios mais seguros, resilientes e habitáveis.

## REFERÊNCIAS

AON. **Global Catastrophe Recap – Q3 2024**. Dez. 2024. Disponível em: https://www.developmentaid.org/api/frontend/cms/file/2025/03/Global-Catastrophe-AON-2-dez-2024.pdf. Acesso em: 3 ago. 2025.

CAPOBIANCO, Vittoria et al. **The potential use of nature-based solutions as natural hazard mitigation measure for linear infrastructure in the Nordic Countries**. Geoenvironmental Disasters, v. 11, n. 1, p. 27, 2024.

DEVANAND, Vishal Balaji et al. **Innovative methods for mapping the suitability of nature-based solutions for landslide risk reduction**. Land, v. 12, n. 7, p. 1357, 2023.

DEVELOPMENTAID. **Brasil em transformação: 2024 – O ano mais quente da história**. Mar. 2025. Disponível em: https://www.developmentaid.org/api/frontend/cms/file/2025/03/Brasil-em-transformacao-1-2024-o-ano-mais-quente-da-historia.pdf. Acesso em: 3 ago. 2025.

EPA. (2021). **Stormwater Best Management Practice — Permeable Pavements**. Washington, D.C.: U.S. EPA. Disponível em: https://www.epa.gov/system/files/documents/2021-11/bmp-permeable-pavements.pdf. Acesso em: 22 out. 2025.

FIERGS. **Impacto das inundações de 2024 em Rio Grande do Sul**. Federação das Indústrias do Rio Grande do Sul, 2024. Disponível em: https://www.fiergs.org.br. Acesso em: 3 ago. 2025.

MAXWALD, M.; CROCETTI, C.; FERRARI, R.; PETRONE, A.; RAUCH, H. P.; PRETI, F. **Soil and Water Bioengineering Applications in Central and South America: A Transferability Analysis**. Sustainability, Basel, v. 12, n. 24, p. 10505, 2020. DOI: 10.3390/su122410505. Disponível em: https://www.mdpi.com/2071-1050/12/24/10505. Acesso em 21 out. 2025.

U.S. DEPARTMENT OF HOMELAND SECURITY. 2013. **National Infrastructure Protection Plan (NIPP)**. Washington, D.C.: DHS. Disponível em: https://www.nist.gov/system/files/documents/cybercommission/-DHS-National_Infrastructure_Protection_Plan_-NIPP.pdf . Acesso em: 23 out. 2025.

ZHANG, W.; WANG, N. **Resilience-based risk mitigation for road networks**. *Structural Safety*, v. 62, p. 57-65, 2016.

12

# ASSESSMENT OF RESILIENT TRANSPORT INFRASTRUCTURE: INTEGRATING NATURE-BASED SOLUTIONS TO ADDRESS CLIMATE-RELATED DISASTERS AND PROMOTE SUSTAINABILITY

LUIZA CARVALHO TEREZA

## ABSTRACT

The growing incidence of natural disasters worldwide, particularly due to climate change, makes it urgent to consider resilient infrastructures. In 2023, approximately 400 extreme events caused about 87,000 deaths and economic losses of US$ 202.7 billion, highlighting the importance of adaptive infrastructure systems. Transportation infrastructure plays a strategic role, as its ability to recover quickly is essential for the continuity of essential services, especially in disaster scenarios. The resilience of this infrastructure depends on its ability to withstand, adapt to, and recover from events, which involves not only conventional engineering, but also Nature-Based Solutions (NbS). These solutions, such as the revegetation of slopes and the creation of green corridors, can improve the sustainability and robustness of infrastructure. In Brazil, where climate-related disasters have caused increasing damage, adaptation to climate change and integrating of NbS into infrastructure planning are potential strategies for mitigating risks and strengthening the resilience of transportation networks, ensuring environmental, social, and economic benefits.

DOI: 10.66949/p1t7w5n8

**Keywords:**
Resilient infrastructure, nature-based solutions (NbS), transportation systems, WIPW.

## *INTRODUCTION*

The world is facing increasingly severe climate change, marked by a rise in the frequency and intensity of extreme weather events. In 2023 alone, according to the International Disaster Database, approximately 400 extreme natural events were recorded, resulting in about 87,000 deaths and economic losses exceeding US$ 202.7 billion. These figures highlight not only the severity of the climate crisis but also the structural vulnerability of cities and regions whose infrastructure was designed for climatic conditions that no longer correspond to the current reality. The climate crisis is evident not only in the magnitude of the damage but also in the inability of many regions to prevent, withstand and recover from its impacts.

In Brazil, this scenario is particularly critical. Between 2020 and 2023, the annual average number of climate-related disasters doubled, rising from 2,073 to 4,077 events (Development Aid, 2024). Between 1995 and 2023, cumulative losses totaled US$ 107 billion (AON, 2024). The floods in Rio Grande do Sul between April and May 2024 are an emblematic example of this trend: there were 182 deaths, estimated losses of around US$ 5 billion, and 94.3% of the state's economic activities were affected (Fiergs, 2024). Beyond the material damage, the event exposed the fragility of the mobility, logistics, and supply systems, revealing how infrastructure is a central element for public safety.

Transportation infrastructure is recognized as one of the sixteen critical systems essential to the functioning of contemporary society (US Department of Homeland Security, 2013). When it is interrupted, the costs are not limited to physical reconstruction: there are significant indirect costs, such as the paralysis of

economic activities, the isolation of communities, and the disruption of access to essential services. The recovery time for an affected region is directly related to the functionality of the transport network: a compromised road network delays aid, hinders supplies, and can exacerbate humanitarian crises. In extreme situations, the interruption of mobility can mean the difference between a controllable disaster and a prolonged tragedy.

Given this scenario, infrastructure resilience becomes a strategic imperative. The literature defines resilience as the ability of a system to withstand, adapt to, and recover from external shocks. In the field of civil infrastructure, this ability is synthesized in four fundamental attributes, according to Zhang and Wang, 2016: (i) robustness: the ability to maintain minimum service levels even in the face of impacts; (ii) speed: the time required to restore operations after an event; (iii) redundancy: the existence of alternative routes or systems capable of performing critical functions; (iv) resource mobilization capacity: the institutional ability to diagnose problems and act efficiently.

However, traditional engineering solutions, centered on rigid and impermeable structures, have proven to be inadequate in the face of increasingly severe weather events. Historically, drainage management in linear infrastructures has been guided by the principle of accelerating surface runoff, quickly directing water into macro-drainage systems or adjacent watercourses. Nevertheless, changes in precipitation patterns, increased imperviousness, and the greater frequency of extreme events highlight the need to rethink this paradigm, incorporating mechanisms capable of retaining, regulating, and infiltrating water whithin the territory itself.

In this context, distributed micro-drainage—which involves devices such as vegetated drainage ditches, infiltration trenches, filter barriers, and permeable pavements for technical support—has been established as an essential strategy for promoting a more balanced hydrological cycle, reducing flow peaks, and alleviating pressure on large-scale infrastructure. Technical studies promoted by institutions such as the Environmental Protection Agency (EPA) demonstrate that such systems are effective in reducing runoff

volume and restoring the infiltration processes characteristic of natural environments.

It is in this horizon that Nature-based Solutions (NbS) gain relevance. These are understood as design and operational approaches that mimic ecosystem functions, integrating soil, vegetation, and water into infrastructure performance.

In the case of road infrastructure, NbS include technical revegetation and slope stabilization using native species, the installation of vegetated swales and linear bioretention basins along the road right-of-way, the restoration and protection of adjacent wetlands, and the adoption of distributed infiltration devices as part of the road drainage system. These solutions promote the reduction of surface runoff, the mitigation of erosion processes, flood control, and increases geotechnical resilience, contributing to extending the infrastructure's service life and improving its interaction with the surrounding environment.

The adoption of these strategies represents a paradigm shift: from infrastructure conceived as an element separate from the physical environment to a hybrid and adaptive model, in which water is treated as a structural variable rather than an unwanted byproduct. The effective implementation of NbS requires inter-institutional coordination, integration between civil engineering, territorial planning, and environmental management, as well as regulatory and methodological adjustments, especially in the context of project design, maintenance, and public procurement. In this sense, building and managing resilient infrastructures is not merely a response to the climate crisis, but a prerequisite for ensuring functionality, safety, service continuity, and sustainable development, recognizing that transportation networks sustain not only material flows, but lives, economies, and territorial cohesion.

## *OBJECT PRESENTATION: NATURE-BASED SOLUTIONS*

NbS have proven to be an effective alternative for addressing the challenges posed by climate change and natural disasters, parti-

cularly in the construction and maintainance of resilient infrastructure. Although the adoption of NbS is still in its early stages, some countries have stood out in implementing these solutions, particularly in the rail infrastructure sector, where the United Kingdom is considered a pioneer. Recent studies indicate that the UK has been one of the leading countries in the adoption of NbS, followed by Italy, Spain, and France, which have implemented various initiatives in their infrastructures, as in the case of the Alpine regions in northern Italy and specific areas of France and Spain.

These countries use NbS in various ways, tailored to their climates and types of infrastructure. However, while examples of NbS implemented in these countries do exist, they are not yet widespread. Most of the literature and case studies on NbS come from countries in Europe, but the implementation of nature-based solutions is expanding as more evidence on their effectiveness becomes available. Nature-based Solutions can be classified in three main approaches, as identified in recent studies, (Capobianco, 2024):

**- Green Approaches**: These involve the use of vegetation—such as planting trees and reinforcing vegetation cover—to stabilize the soil, reduce landslides, and improve drainage, thereby helping to prevent flooding and erosion. Examples include the use of protective forests along roads or railways to reduce the risk of landslides.

**- Blue Approaches**: These involve water-based solutions, such as retention basins and constructed wetlands, which help reduce flood risks by absorbing and storing rainwater, thereby protecting adjacent infrastructure. These approaches are particularly effective in regions susceptible to frequent flooding.

**- Hybrid Approaches**: A combination of green and blue approaches, such as the use of vegetation in conjunction with natural drainage systems, which offer a more robust and tailored solution for areas vulnerable to multiple climate-related hazards, such as floods and landslides.

These practices can be implemented on different scales, ranging from individual structures to national networks, through

retrofitting, new construction, or preventive maintenance. The strategies can be categorized as prevention, which aims to eliminate or reduce vulnerability, or proactive approach, which focuses on risk reduction and the adaptation of existing infrastructures.

In addition, NbS have both direct and indirect impact on linear infrastructure, such as highways and railways. While many of these solutions are implemented in the areas surrounding such infrastructure (indirect impact), they still generate substantial benefits by reducing the risks of natural disasters, such as landslides and floods, which affect the functionality and safety of this infrastructure. For example, protective forests and constructed wetlands can significantly reduce risks to infrastructures, improving the resilience of the entire transportation network.

## Case Study 1: Bioengineering in Leizaran, Spain

When discussing the concept of NbS, it is essential to integrate the discipline of Soil and Water Bioengineering (SWB). SWB combines technology and biology, using native plants and plant communities as living building materials to address erosion and conservation issues. The central objective of SWB is to protect infrastructure and land uses in conflict scenarios between opposing needs: the land use requirements for activities and infrastructures and the need of natural systems for space to develop (Casabianco *et al*, 2024).

Located at the northern tip of the Iberian Peninsula, the Basque Country is a region marked by mountainous terrain and a humid Atlantic coastline, characterized by high annual rainfall and abrupt variations in altitude over short distances. This combination of orographic and climatological factors favors the occurrence of erosion processes and mass movements, especially in areas of road infrastructure built on steep slopes. The Basque mountain ranges, covered by often shallow soils and temperate Atlantic vegetation, make slope stability a constant challenge for local engineering. Furthermore, dense urbanization in narrow valleys and the expan-

sion of roads and railways through complex terrain intensify the region's susceptibility to landslides, requiring stabilization solutions that balance safety, durability, and integration with the existing physical environment.

In this context, in the Basque Country, Spain—where landslides are common precisely because of these orographic and climatological conditions—Nature-based Solutions (NbS) have been preferred over traditional engineering solutions over the past fifteen years (Figure 1). The local Department of Road Infrastructure has comissioned several technical designs along road slopes, with a focus on techniques such as natural gabion walls and surface drainage using natural drains, which are effective solutions for slope stabilization and erosion protection. These techniques, in addition to restoring the morphology of the slopes, promote the recovery of the natural gradient and vegetation, reinforcing the integration between road infrastructure and the landscape.

**Figure 1:** Example of natural gabion walls along a mountain road in Leizaran, Spain: a) during construction, and b) after the establishment of the plants. *Source: Capobianco et al., 2024.*

In Santa Elena, Spain, an innovative solution was implemented to combat erosion on a glacial ridge, which was causing debris and large rocks to slide onto the road: a system of terraces was created along the slope (Figure 2). The base of the structure was formed by a 5-meter-high dry-stone wall, designed to provide stability.

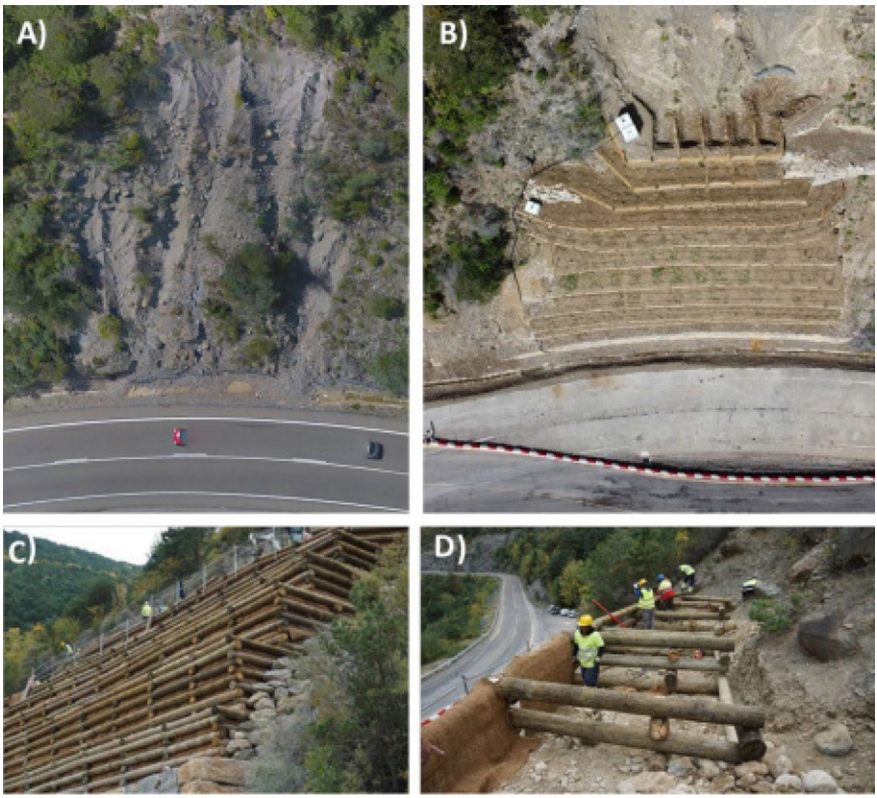



**Figure 2:** a) Aerial photo of the slope before the intervention, b) During construction c) Detail of the wooden lands, d) Construction of the wooden gabions that support the terraces. *Source: Capobianco et al., 2024*

Above the masonry foundation, the remaining ten terraces were built using logs, forming structures known as wooden gabions—or Krainer Cribwalls. These logs were stacked and filled with local sediment, providing a more natural and sustainable way to stabilize the soil and prevent large rocks and debris from sliding onto the road.

To ensure that vegetation could establish itself and help stabilize the soil, a 10-centimeter layer of organic soil was added, allowing for the planting of shrubs. Over time, these shrubs will help strengthen the area by forming roots that help to anchor the soil. In addition, 1-meter-deep holes were dug every 3 meters along

the terraces and filled with organic soil to plant larger trees. These trees, with their deep roots, will help further stabilize the slope in the long term.

The main objective of this structure is that, over the course of 20 to 30 years, as the logs decompose, the vegetation will take over the role of stabilizing the slope in a sustainable way. This approach has yielded positive results, not only in terms of erosion protection but also by contributing to a resilient infrastructure that adapts over time. By integrating natural engineering, this solution allows the system to recover in a self-sustaining manner, with vegetation playing a crucial role in maintaining slope stability as the wood degrades.

The technique mentioned above demonstrates the effectiveness of NbS when integrated into existing infrastructure, offering a sustainable, long-term alternative for slope stabilization and the protection of transportation infrastructure. This hybrid approach combines technical performance with ecological balance, contributing to the reduction of geotechnical risks and adaptation to climate change. There are international reference projects that can serve as pilot projects for application in Brazilian contexts, especially on highways and railways with recurring slope instabilities, offering viable paths for large-scale replication.

## Case Study 2: San Luis de Chillogallo, Ecuador

The Andean region is characterized by complex geomorphological conditions, including steep slopes, young soils of volcanic origin, high rainfall, and intense surface erosion. These factors make linear infrastructures, such as highways—which often follows cuttings and embankments prone to instability—particularly vulnerable.

A prime example of this approach is the slope stabilization project in San Luis de Chillogallo, located in the southern part of the Quito Metropolitan Region, in a transitional zone between dense urban areas and rural slopes (Maxwald *et al.*, 2020). The slope in question exhibited progressive laminar erosion, the formation

of surface gullies, and signs of shallow instability, exacerbated by intense seasonal rainfall, volcanic soils highly susceptible to disintegration, the absence of established vegetation cover, and changes in the hydrological regime resulting from urban expansion.

These processes threatened the stability of the adjacent roadway and compromised traffic safety, especially during heavy rainfall. Conventional retaining structures would require large, rigid structures, which are costly and offer limited potential for blending into the landscape.

The intervention (Figure 3) employed a hybrid bioengineering system, combining biodegradable structural elements with living vegetation, so that stability would evolve over time. The technical arrangement consisted of: wooden crib walls (lattice structures that provide initial support to the slope), live palisades, consisting of vegetative stakes capable of rooting and reinforcing the terrain, transplantation of native grass sod (sod slabs), promoting immediate soil cover and reducing surface erosion, and micro--drainage adjustments distributed along the body of the slope, controlling internal water circulation without quickly expelling it from the system.

**Fiigure 3:** NbS in San Luis de Chillogallo, shortly after completion in 2012 and in 2018 during monitoring. *Source: (Maxwald et al., 2020).*

The system was designed according to the principle of progressive replacement of the structural function: in the short term, the stability of the slope would be ensured primarily by the wooden structure and the geometry of the arrangement, providing imme-

diate support to the slope; in the medium and long term, as the wood decomposed, it was expected that the root development of the planted vegetation would gradually take over the role of mechanically reinforcing the soil, consolidating stability in a continuous and adaptive way.

These results demonstrate that the solution not only stabilized the slope but reorganized its hydrological and mechanical behavior, creating a self-sustaining support system over time.

## *STRATEGIES FOR ASSESSING INFRASTRUCTURE RESILIENCE*

Continuing the discussion on how to ensure the continuous operation of infrastructure in the face of natural disasters, it is essential to adopt effective resilience assessment strategies. In a scenario marked by increasingly intense and unpredictable climate change, these assessments are critical for identifying vulnerabilities, guiding preventive interventions, and ensuring that critical systems maintain their functionality even under adverse conditions.

In this context, a useful tool for this analysis is WIPW (Weighted Importance of Performance Weights), a quantitative methodology based on graph theory that measures the performance capacity of a network following an extreme event, developed by Zhang and Wang in 2016. WIPW integrates critical variables—such as network topology, the redundancy of alternative routes, traffic patterns, and the probability of failure of key components, such as bridges and highways, as well as the location of emergency response centers.

The main advantage of this approach is its ability to provide a detailed and systematic overview of how a transportation network might be affected by natural disasters, identifying vulnerabilities and opportunities to improve the resilience of the infrastructure. By integrating WIPW into infrastructure planning, it becomes possible to quantify the potential impact of different failure scenarios, compare risk mitigation alternatives, and make informed decisions about which measures to adopt to increase the network's adaptability.

This not only helps optimize infrastructure performance during a crisis, but also enables more efficient planning for new projects, taking into account both operational efficiency and long--term sustainability.

Below are the critical variables considered in this resilience assessment model, along with the NbS practices that could be applied at each stage:

| Rated Component (WIPW) | Objective | Possible Interventions | Examples of Nature-Based Solutions (NbS) |
|---|---|---|---|
| **Increased reliability of critical components (retrofit)** | Reducing the likelihood of failure of vulnerable bridges, viaducts, and slopes | Structural reinforcement and local stabilization | Revegetation of slopes; bioengineering; rain gardens; Bioretention for drainage |
| **Network topology optimization (new connections/ alternative routes)** | Ensuring redundancy and safe routes in the event of an outage | Creation of alternative routes or reinforcement of secondary links | Green corridors; permeable pavements; Preservation/ restoration of wetlands |
| **Changing traffic patterns (operational management)** | Maintaining flow and accessibility during extreme events | Preferred routes, temporary reconfiguration of the fabric, access control | (NBS does not apply directly – it is an operational measure) |
| **Strategic location of response centers** | Reducing response time and ensure continuous access to emergency services | Positioning of logistics bases and critical units | Creating green buffering and water retention areas that protect facilities |

In addition to WIPW, which enables the assessment of the resilience of transportation networks and other infrastructure, the use of Geographic Information Systems (GIS) also offers an effective solution for identifying and analyzing areas susceptible to natural disasters, such as landslides, floods, and other climate risks.

GIS facilitates the mapping of factors such as susceptibility to landslides, rainfall intensity, and terrain conditions, enabling infrastructures to be assessed based on local characteristics and the risks involved. With these tools, it is possible to prioritize the most vulnerable areas and guide the implementation of Nature-based Solutions (NbS) to mitigate these risks.

To maximize the effectiveness of these methodologies, it is essential to have reliable and up-to-date GIS databases that pro-

vide accurate and detailed information for decision-making, ensuring that interventions are strategically and efficiently targeted. The combined use of WIPW and GIS strengthens the planning and management of resilient infrastructures, making solutions more adaptive and sustainable in the face of climate challenges.

## DISCUSSION

The adoption of Nature-based Solutions (NbS) in Brazil represents a crucial step towards building resilient infrastructure in the face of growing climate challenges, such as flooding, erosion, and landslides. Although the application of NbS in large infrastructure projects in Brazil is still in its early stage, the promising results observed in other countries indicate that these solutions can be an effective alternative for mitigating risks and adapting infrastructure to the reality of climate change. However, for NbS to be effectively implemented in the country, a number of barriers must be overcome, including the need for technical improvement, regulatory adjustments, and the greater collaboration among different sectors.

One of the key advantages of NbS is their ability to function not only as standalone solutions but as part of an integrated resilience system. By incorporating practices such as planting vegetation to stabilize soils or sustainable drainage systems to prevent flooding, these approaches offer multiple benefits, such as the preservation of local ecosystems, the protection of biodiversity, and the reduction of maintenance costs for conventional infrastructure. For example, in areas at risk of landslides, protective forests can be established to reduce erosion while simultaneously improving soil and water quality, yielding benefits for both infrastructure and the environment.

Furthermore, by integrating NbS into transportation infrastructure planning, it is possible to create more adaptable networks. In Brazil, where road and rail infrastructure face constant challenges due to their vulnerability to natural disasters, NbS offer a solution that goes beyond simple post-disaster recovery. They offer preventative strategies aimed at reducing damage before it occurs, which

is essential for ensuring service continuity and minimizing repair and reconstruction costs. Sustainable drainage, for example, can be installed along highways to help absorb water from heavy rains, reducing the risk of flooding and improving roadway resilience.

However, for NbS to become a common practice in Brazil, proactive planning is essential. The country needs to adopt an integrated approach, taking climate change into account in the process of planning and implementing infrastructure. This involves identifying vulnerable areas, adapting public policies, and creating incentives for the use of NbS, such as the preservation of green spaces and the reinforcement of natural slopes.

In this process, the use of assessment tools and geotechnologies, such as GIS, plays a strategic role. They enable more accurate risk mapping, allow for monitoring the effectiveness of interventions, and facilitate the adaptation of solutions to specific local conditions. This approach must be flexible and responsive to regional realities, enabling the application of NbS from the semi-arid Northeast, marked by prolonged droughts, to the mountainous areas of the Southeast, which are vulnerable to landslides and floods.

In Minas Gerais, SEINFRA-MG (Minas Gerais State Secretariat for Infrastructure, Mobility and Partnerships) and DER-MG (Minas Gerais State Department of Highways) have adopted practices that reflect this integrated approach. Through the DER-MG Observatory and field data collection, the state monitors geotechnical conditions of highways, accidents, and structural failures, supplemented by collaborative information from users of apps such as Waze, a navigation system that allows drivers to report time road conditions in real time, such as potholes, construction, or traffic jams. This primary data, combined with geospatial analysis, provides a detailed view of risks and informs preventive decisions, enabling proacting interventions and strengthening infrastructure resilience.

To make these analyses even more robust, it is essential to consolidate the data into a single national database, which would allow states to share consistent information, prevent data fragmentation, and ensure strategic decisions based on reliable evidence. This unified base could include not only indicators of extreme

events, such as floods and landslides, but also detailed geotechnical information and records of drought periods, providing an integrated view of the country's climate and geological risks.

Deepening understanding of the benefits and effectiveness of NbS is a challenge that must be addressed. To overcome this, it is necessary to evaluate initiatives in countries such as the United Kingdom, where NbS have been successfully applied to railway infrastructure, or France and Spain, which have integrated nature-based approaches to protect their transportation networks. Investing in technical training and environmental education, as well as sharing experiences and lessons learned, is crucial to ensure that NbS are viewed as a valid and effective solution. Implementing NbS pilot projects on specific stretches of highways or railways can be an important first step toward testing the viability of these solutions in different climatic and geographic contexts.

In addition, collaboration with local stakeholders, such as farmers, landowners, and local communities, can be a key factor in the success of NbS. Many of these solutions rely on the use of areas adjacent to infrastructure, and cooperation will be necessary to make their implementation feasible. Encouraging public-private partnerships and creating financial incentives can help enable projects that integrate NbS with traditional infrastructure.

Finally, NbS are not a one-size-fits-all solution, but rather a complement to conventional infrastructure. In some cases, a hybrid approach—combining conventional structures with nature-based solutions—may be the most efficient. This type of approach makes it possible to take advantage of NbS while ensuring the robustness and durability of traditional infrastructures, offering a balance between sustainability and technical efficiency.

## CONCLUSION

The persistent insufficiency of investments in prevention highlights a structural flaw in the way Brazil and much of the world view disaster risk. The significant ride in the economic costs of climate-related disasters in recent years is not an isolated phenomenon, but rather a symptom of a management model that prioritizes

emergency and corrective responses over strategic and proactive planning. The US$ 6.4 billion in losses recorded in Brazil between January and September 2024 alone (AON, 2024) illustrate a paradoxical cycle: the less that is invested in prevention, the greater the expenditure on reconstruction becomes, deepening territorial vulnerabilities and inequalities rather than addressing them.

The low institutional and budgetary capacity observed in most municipalities reveals a critical mismatch between the scale of the challenges and the existing management instruments. Without structured and continuous funding, the prevention policy becomes fragile, short-lived, and dependent on emergency decrees, which address the effects of disasters but not their socio-environmental causes.

In this context, the transition to a preventive and resilient approach is not merely technical but also political, requiring a reordering of priorities, competition for resources, and a transformation of development models.

Thus, the resilience of transportation infrastructure becomes central. Resilient infrastructures do not only mean stronger structures, but systems capable of adapting, recovering quickly, and operating in an integrated manner with the surrounding territory. This is where NbS take on a strategic role. More than just "green" alternatives, they represent a paradigm shift: recognizing nature as a functional infrastructure, capable of reducing hydrological and geotechnical risks, extending the useful life of assets, and generating social, environmental, and economic benefits simultaneously.

However, for this transition to translate into practical and effective decisions, it is essential to incorporate robust analytical tools. Models such as WIPW make it possible to assess vulnerabilities and prioritize interventions in critical stretches of transportation networks, optimizing investments in times of fiscal constraint. Similarly, the use of GIS makes it possible to identify areas susceptible to landslides, simulate future climate impacts, and integrate environmental, structural, and social data, guiding territorially coherent and preventive decisions.

Thus, investing in infrastructure resilience is not an additional cost, it is a condition for protecting lives, ensuring territorial

justice, and sustaining development. In a country marked by great territorial diversity and deep socio-spatial inequalities, the adoption of strategies that combine preventive planning, NbS, territorial intelligence, and prioritization models, such as WIPW, represents not only a technical response to the worsening climate crisis but also an ethical commitment to building safer, more resilient, and more livable territories.

## REFERENCES


AONs. **Global Catastrophe Recap – Q3 2024**. Dec. 2024. Available at: https://www.developmentaid.org/api/frontend/cms/file/2025/03/Global-Catastrophe-AON-2-dez-2024.pdf. Accessed on: 3 ago. 2025.

CAPOBIANCO, Vittoria et al. **The potential use of nature-based solutions as natural hazard mitigation measure for linear infrastructure in the Nordic Countries**. Geoenvironmental Disasters, v. 11, n. 1, p. 27, 2024.

DEVANAND, Vishal Balaji et al. **Innovative methods for mapping the suitability of nature-based solutions for landslide risk reduction**. Land, v. 12, n. 7, p. 1357, 2023.

DEVELOPMENTAID. **Brazil in transformation: 2024 – The hottest year in history**. Mar. 2025. Available at: https://www.developmentaid.org/api/frontend/cms/file/2025/03/Brasil-em-transformacao-1-2024-o-ano-mais-quente-da-historia.pdf. Accessed on: 3 ago. 2025.

EPA. (2021). **Stormwater Best Management Practice — Permeable Pavements**. Washington, D.C.: U.S. EPA. Available at: https://www.epa.gov/system/files/documents/2021-11/bmp-permeable-pavements.pdf. Accessed on: 22 out. 2025.

FIERGS. **Impact of the 2024 floods in Rio Grande do Sul**. Federation of Industries of Rio Grande do Sul, 2024. Available at: https://www.fiergs.org.br. Accessed on: 3 ago. 2025.

MAXWALD, M.; CROCETTI, C.; FERRARI, R.; PETRONE, A.; RAUCH, H. P.; PRETI, F. **Soil and Water Bioengineering Applications in Central and South America: A Transferability Analysis**.

Sustainability, Basel, v. 12, n. 24, p. 10505, 2020. DOI: 10.3390/su122410505. Disponível em: https://www.mdpi.com/2071-1050/12/24/10505. Acesso em 21 out. 2025.

U.S. DEPARTMENT OF HOMELAND SECURITY. 2013. **National Infrastructure Protection Plan (NIPP)**. Washington, D.C.: DHS. Disponível em: https://www.nist.gov/system/files/documents/cybercommission/-DHS-National_Infrastructure_Protection_Plan_-NIPP.pdf . Acesso em: 23 out. 2025.

ZHANG, W.; WANG, N. **Resilience-based risk mitigation for road networks**. Structural Safety, v. 62, p. 57-65, 2016.

# PARTE V

## NOTAS FINAIS

# PART V

## FINAL NOTES

13

# INFRAESTRUTURA RESILIENTE A ALTERAÇÕES E DESASTRES CLIMÁTICOS EM ECONOMIAS EMERGENTES E EM DESENVOLVIMENTO: RISCOS, DESAFIOS E OPORTUNIDADES

**ABHIJIT DATEY,**
**RAINA SINGH,**
**AISHWARYA RAJ**[1]

## A NECESSIDADE DE INFRAESTRUTURAS RESILIENTES A ALTERAÇÕES E DESASTRES CLIMÁTICOS (DRI)

A infraestrutura permite o bom funcionamento da sociedade, ao apoiar suas principais funções socioeconômicas. É também um fator-chave para o crescimento econômico e, por isso, a maioria dos mercados emergentes e economias em desenvolvimento (MEEDs) dá grande ênfase ao investimento em infraestrutura. Em 2024, a Formação Bruta de Capital Fixo (FBCF), que indica o investimento em ativos fixos, atingiu US$ 29 trilhões, contra apenas US$ 723 bilhões em 1970 (World Ban, s.d.), o que demonstra que houve um investimento maciço em infraestrutura em todo o mundo para apoiar o crescimento econômico e a urbanização. É importante observar, também, que mais de 90% da infraestrutura

1 Este capítulo é uma contribuição da Coalizão para Infraestruturas Resilientes a Desastres (CDRI), com sede em Nova Délhi, Índia. A CDRI é uma coalizão formada por 53 países, 12 organizações internacionais e o setor privado. A CDRI se dedica a aumentar a resiliência dos sistemas de infraestrutura face aos riscos climáticos e de desastres. Seus membros têm acesso a conhecimentos especializados globais, financiamento, suporte técnico, oportunidades de pesquisa, soluções inovadoras e melhores práticas internacionais. Mais informações estão disponíveis em www.cdri.world.

DOI: 10.66949/y8f3n6k2

global foi construída apenas nos últimos 50 anos, e que a maior parte da infraestrutura necessária até 2050 ainda vai ser construída (CDRI, 2023a).

Uma estimativa sugere que o investimento acumulado em infraestrutura deverá atingir até US$ 106 trilhões até 2040. Desse montante, uma parcela significativa, de US$ 61 trilhões, será destinada à infraestrutura de transporte e energia. Dois terços desse investimento em infraestrutura serão destinados à Ásia, região que abriga as principais economias em desenvolvimento do mundo, passando por um rápido processo de industrialização, urbanização e crescimento populacional. Como a urbanização também concentra um grande número de pessoas em uma área geográfica relativamente menor, os riscos de desastres também se concentram. A urbanização está gerando uma demanda excepcionalmente alta na África e no Sul da Ásia, especialmente por sistemas de transporte público, serviços públicos e conectividade digital (McKinsey, 2025). Além da construção de infraestrutura para o futuro, serão necessários cerca de US$ 9,2 trilhões em investimentos anuais para suprir as deficiências atuais de infraestrutura existentes e alcançar os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS). A maior parte desse investimento será necessária nos países de baixa e média renda (PBMR), embora ainda seja substancialmente menor do que nos países de média e alta renda (PMAR) (CDRI, 2023a).

Por um lado, os investimentos em infraestrutura estão aumentando em todo o mundo, mas, por outro lado, as perdas relacionadas à infraestrutura dos ativos existentes estão crescendo exponencialmente, corroendo os investimentos. Estima-se que as perdas globais em infraestrutura, calculadas como Perda Média Anual (PMA) decorrentes de riscos climáticos e geológicos, ultrapassem 700 bilhões (CDRI, 2023a), embora essa seja apenas uma estimativa das perdas patrimoniais e não reflita o quadro completo. Os custos globais dos danos causados por desastres chegam a cerca de US$ 2,3 trilhões por ano, quando se incluem os impactos indiretos e sobre os ecossistemas (UNDRR, 2025). O relatório “Global Infrastructure Resilience (GIR) 2025” do CDRI destaca que países como as Filipinas, Bangladesh e Barbados podem perder mais de 8% do seu PIB devido a danos causados por desastres

entre 2025 e 2050. O relatório também afirma que os custos indiretos decorrentes de falhas na infraestrutura causadas por desastres são mais de sete vezes superiores aos custos dos danos diretos à própria infraestrutura. Esses custos econômicos indiretos abrangem desde interrupções no comércio até a perda de empregos e de oportunidades de subsistência. Além disso, as perdas econômicas decorrentes de interrupções em serviços como eletricidade ou água são muito maiores do que os danos diretos aos bens (CDRI, 2025a). O cenário de risco também está mudando devido aos impactos das mudanças climáticas. Riscos como ciclones tropicais, inundações e incêndios florestais estão se tornando mais intensos, e novos riscos emergentes, como o calor extremo, cujos impactos ainda são pouco estudados e estão sendo investigados. O risco para os ativos de infraestrutura aumenta devido a eventos de risco mais frequentes ou intensos. Dados da Base de Dados de Eventos de Emergência (Emergency Events Database – EM-DAT) indicam que, em 2024, o número de desastres registrados atingiu 393, superando a média anual das duas décadas anteriores, e as perdas econômicas diretas dispararam para mais de US$ 240 bilhões (CRED, 2025). Mais recentemente, em 2025, eventos extremos como o ciclone Remal no sul da Ásia, as enchentes na Bolívia e o furacão Melissa demonstram que os danos à infraestrutura vão muito além da destruição física, afetando mercados, meios de subsistência e serviços essenciais.

Assim como os custos dos desastres têm sido subestimados, o mesmo ocorre com os benefícios do investimento na redução do risco de desastres e em infraestruturas resilientes a desastres (Disaster Resilient Infrastructure – DRI). Hallegatte et al. (2019) demonstram que investir em infraestrutura resiliente em países de baixa e média renda gera US$ 4 em benefícios para cada US$ 1 investido — com um benefício líquido total de US$ 4,2 trilhões. O CDRI (2023a) refere-se a isso como o "dividendo da resiliência", definido como o conjunto completo de benefícios que podem ser obtidos com o investimento na resiliência da infraestrutura. Entre eles, estão a prevenção de perdas de ativos, a redução de interrupções nos serviços, a melhoria da qualidade e da confiabilidade dos serviços públicos, a aceleração do crescimento econômico e do desenvolvimento social, a redução

das emissões de carbono, o aumento da biodiversidade, a melhoria da qualidade do ar e da água e um uso mais eficiente do solo (CDRI, 2023a). Só é possível colher os frutos dessa resiliência se ela estiver integrada em todo o ciclo de vida de um projeto de infraestrutura, desde o planejamento e o projeto, passando pelo financiamento, comissionamento, operação e manutenção.

A resiliência é a capacidade das sociedades de resistir a, adaptar-se a e recuperar-se de perturbações — sejam elas causadas por desastres naturais, mudanças climáticas ou choques sistêmicos — e determina o ritmo e a equidade do progresso global. Uma infraestrutura resiliente é fundamental para alcançar os objetivos de desenvolvimento sustentável, a adaptação às mudanças climáticas e o crescimento inclusivo (UNDRR, 2025). A CDRI (2023b) define infraestrutura resiliente a desastres como

> "*sistemas e redes de infraestrutura, seus componentes e ativos, bem como os serviços que prestam, capazes de resistir e absorver os impactos de desastres, manter níveis adequados de continuidade de serviço durante crises e recuperar-se rapidamente, de modo a reduzir ou prevenir riscos futuros*".

A infraestrutura não é apenas um conjunto de ativos individuais, mas também uma rede de ativos interligados que, em conjunto, prestam serviços a indivíduos, comunidades, empresas e à economia. A resiliência dessas redes e serviços depende de sua capacidade de: i) resistir e absorver os choques causados pelos impactos de desastres; ii) responder aos danos causados por esses desastres e manter níveis básicos de continuidade do serviço durante as crises; e iii) restaurar os serviços o mais rapidamente possível, de forma a incorporar as lições aprendidas com o desastre e reduzir perdas e danos futuros. Nesses três níveis (ativos de infraestrutura, serviços e usuários), a resiliência deve ser vista não apenas como a capacidade de absorver o próximo desastre, mas também como a capacidade de responder a ele e se recuperar. O fortalecimento da resiliência em ativos e sistemas de infraestrutura exige uma visão abrangente do ciclo de resiliência e a incorporação oportuna das lições aprendidas para reduzir perdas e danos futuros e "reconstruir melhor".

Para aumentar a resiliência dos sistemas de infraestrutura, é necessário que os órgãos públicos e os gestores de ativos reforcem não apenas a capacidade de absorver desastres, mas também a capacidade de responder a choques e se recuperar rapidamente. A Figura 1 mostra o quadro de desenvolvimento da resiliência que fortalece as três capacidades e pode ser aplicado tanto ao nível de um ativo de infraestrutura específico quanto às redes de infraestrutura e seus usuários. Além disso, apresenta uma representação gráfica do dividendo da resiliência.

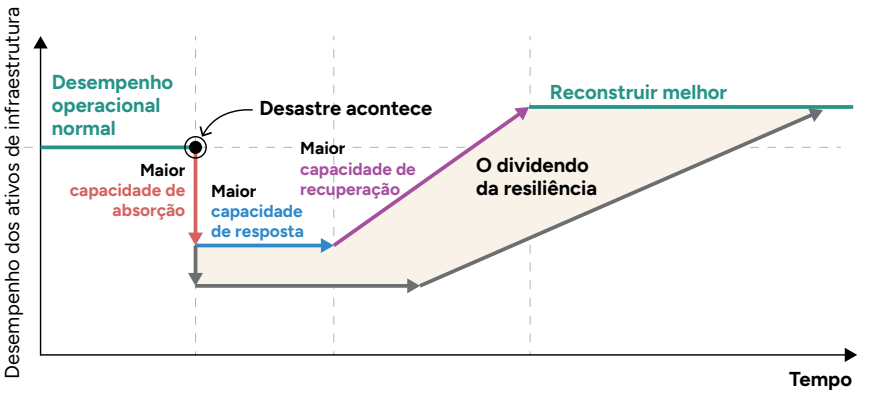



**Figura 1:** Estrutura DRI e as três capacidades para uma infraestrutura resiliente. *Fonte: CDRI, 2025a.*

A Figura 1 também ilustra a natureza dessas três capacidades em relação ao desempenho dos ativos e ao tempo.

- A capacidade de absorção é uma perda repentina de desempenho ou da capacidade de prestar serviços devido às perdas e danos sofridos após um evento de risco. Por exemplo, edifícios resistentes a terremotos, diques, linhas de energia reforçadas contra tempestades, materiais ignífugos e estradas e pontes que permanecem intactas diante de desastres e ajudam um ativo a absorver os impactos.
- A capacidade de resposta é a capacidade de um ativo de infraestrutura ou rede reagir mais rapidamente a quais-

quer impactos causados por desastres. Essa capacidade é sensível ao tempo. Quanto menor for o tempo de resposta, maior será o ganho em resiliência, representado pela área entre a recuperação normal e a recuperação resiliente. Por exemplo, sistemas de alerta precoce, geradores de reserva, sistemas móveis de purificação de água, controle dinâmico de tráfego e redes de comunicação integradas podem permitir uma resposta rápida. Uma boa capacidade de resposta significa que a recuperação e a continuidade dos serviços essenciais também podem ser iniciadas mais rapidamente.

- A capacidade de recuperação é a velocidade com que os ativos de infraestrutura são totalmente restaurados e seus serviços são restabelecidos aos níveis anteriores ao desastre. No gráfico, isso é representado pela inclinação da curva de recuperação — uma inclinação mais acentuada indica uma recuperação mais rápida e uma maior capacidade de recuperação, enquanto uma inclinação mais suave sugere uma capacidade mais fraca. Equipes de reparo pré-organizadas, unidades de infraestrutura modulares, fundos para desastres, ferramentas de avaliação de danos e estratégias inteligentes de reconstrução podem facilitar a rápida recuperação da infraestrutura após um desastre. Para melhorar ainda mais o desempenho dos ativos, as medidas de recuperação podem incluir lições aprendidas com as falhas ocorridas e estratégias para "reconstruir melhor", o que, por sua vez, melhora o desempenho operacional normal e aumenta os ganhos decorrentes da resiliência.

O risco relacionado à infraestrutura é maior nas economias desenvolvidas, uma vez que a maior parte da infraestrutura já está construída e exigirá medidas como adaptação e manutenção aprimorada para continuar operacional em meio a cenários de risco em constante mudança — especialmente diante da intensificação dos riscos decorrentes dos impactos das mudanças climáticas. Portanto, embora as perdas previstas decorrentes de desastres sejam maiores, suas capacidades financeiras e tecnológicas — ou

seja, a capacidade de responder e se recuperar — também são maiores para superar esses desafios. As economias em desenvolvimento e emergentes estão enfrentando desafios em várias frentes ao mesmo tempo. O primeiro desafio é investir estrategicamente em novas infraestruturas para impulsionar o crescimento econômico, reduzir o déficit de infraestrutura e combater as desigualdades subjacentes no acesso. O segundo desafio consiste em institucionalizar e tornar obrigatórias avaliações de risco robustas, bem como revisar as normas e códigos existentes para construção e manutenção, a fim de integrar a resiliência em todo o ciclo de vida da infraestrutura. As economias em desenvolvimento e emergentes, especialmente na Ásia, na África e na América do Sul, estão enfrentando impactos muito mais graves das mudanças climáticas; portanto, o terceiro desafio consiste em reduzir as perdas decorrentes de desastres nos ativos existentes e disponibilizar recursos financeiros para atender a essas contingências emergentes. Esses três desafios também criam oportunidades e vantagens para a adoção antecipada de infraestruturas resilientes a mudanças e desastres climáticos. Para os países em desenvolvimento e emergentes, qualquer novo investimento em infraestrutura que não reforce a resiliência é como derramar água em uma cesta de bambu.

A próxima seção explica o panorama dos riscos de infraestrutura nas economias em desenvolvimento e emergentes em relação aos riscos globais. O estudo analisa mais detalhadamente as perdas previstas em infraestrutura, os setores afetados e os riscos que suscitam preocupação, além de quantificar o impacto dos desastres em termos de perda de ativos e de perda do PIB.

## PANORAMA DOS RISCOS DE INFRAESTRUTURA EM ECONOMIAS EM DESENVOLVIMENTO E EMERGENTES

Existem vários modelos e plataformas de avaliação de riscos disponíveis que podem ser consultados e utilizados para esse fim. O Modelo Global de Risco (GRM) da UNDRR, um componente essen-

cial do Relatório de Avaliação Global (Global Assessment Report – GAR), fornece dados sobre riscos, exposição e vulnerabilidade. O Modelo Global de Terremotos[2], que oferece ferramentas de modelagem de risco de acesso aberto e conjuntos de dados sobre vulnerabilidade relacionados a perigos e riscos sísmicos. Embora esses modelos não tivessem como objetivo explorar especificamente o risco de infraestrutura em termos financeiros.

Em 2023, a Coalizão para Infraestruturas Resilientes a Desastres (Coalition for Disaster Resilient Infrastructure – CDRI) lançou a plataforma de dados do Modelo Global de Risco de Infraestrutura e Índice de Resiliência (Global Infrastructure Risk Model and Resilience Index – GIRI)[3], que mede e analisa o risco e a resiliência das infraestruturas nos principais setores, incluindo energia, transporte, telecomunicações, água, educação e sistemas de saúde em todo o mundo. A plataforma fornece avaliações detalhadas de risco para ativos de infraestrutura expostos a riscos relacionados ao clima, apoiando a tomada de decisões baseadas em evidências para a redução do risco de desastres, a adaptação climática e o desenvolvimento de infraestruturas resilientes em todos os países e níveis de renda. O GIRI fornece indicadores de risco financeiro na forma de Perda Média Anual (PMA) a nível global e nacional — ou seja, a estimativa dos passivos contingentes em setores de infraestrutura crítica decorrentes de desastres (Figura 2). O GIRI também pode ser aplicado nos níveis regional, nacional e subnacional, aproveitando dados mais precisos e o conhecimento local. Embora as avaliações de risco regionais proporcionem uma compreensão mais profunda das variações geográficas e setoriais, as avaliações subnacionais podem contribuir significativamente para o planejamento preventivo e a proteção de ativos (CDRI, 2025a).

2 O Modelo Global de Terremotos (Global Earthquake Model – GAM) está disponível em https://www.globalquakemodel.org/products.

3 Todos os dados apresentados nesta seção estão disponíveis na plataforma de dados GIRI, disponível no link https://giri.unepgrid.ch/. O GIRI foi desenvolvido por um consórcio de organizações científicas e técnicas, nomeadamente a Fundação de Pesquisa CIMA (Itália), a INGENIAR Risk Intelligence (Colômbia), o UNEP-GRID de Genebra (Suíça) e o Instituto Geotécnico Norueguês (Noruega). A plataforma é de acesso aberto.

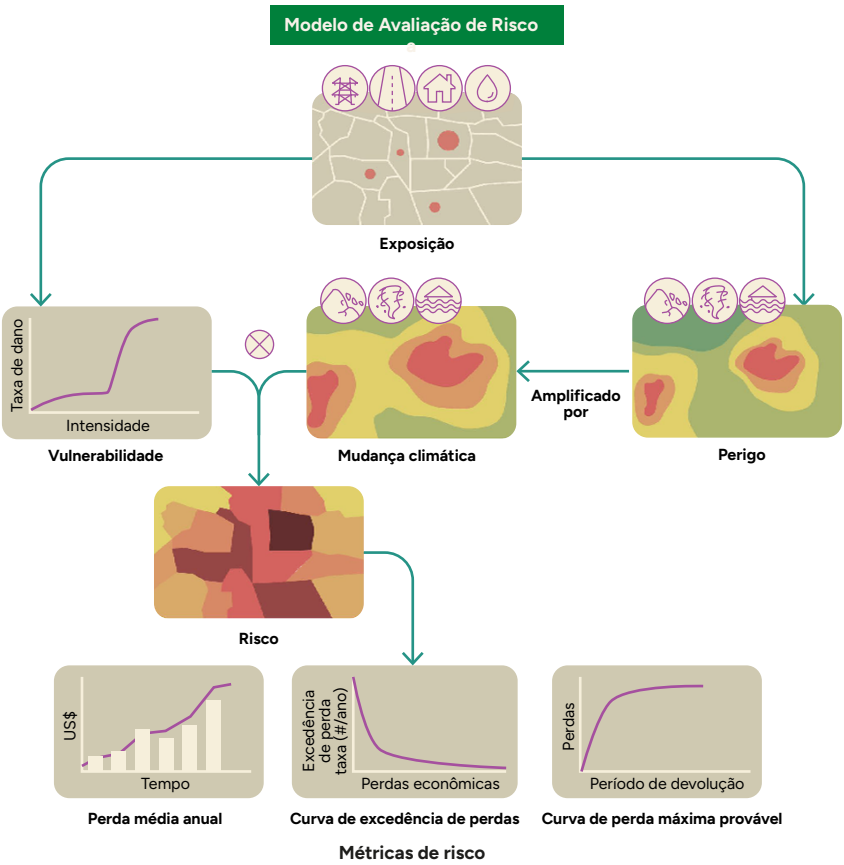



**Figura 2:** Metodologia GIRI. *Fonte: CDRI, 2025a.*

O GIRI abrange 6 tipos de riscos (terremotos, tsunamis, deslizamentos de terra, inundações, ciclones tropicais e secas) e 9 setores de infraestrutura (energia, rodovias e ferrovias, portos e aeroportos, água e esgoto, telecomunicações, petróleo e gás, educação, saúde e edifícios). Todos os dados utilizados nesta seção do capítulo são provenientes da plataforma de dados GIRI, e a análise é de autoria dos autores, salvo indicação em contrário.

Esta seção analisa a infraestrutura e o risco de desastres nas 50 principais economias em desenvolvimento e emergentes do mundo. Para selecionar os países, foram coletados os dados do Produto Interno Bruto (PIB) (IMF, s.d.) de todos os países referentes ao ano de 2023, e os países foram selecionados com base em sua classificação como emergentes e em desenvolvimento, conforme

determinado pelo Fundo Monetário Internacional (FMI). A lista de países e seus respectivos PIBs é apresentada na Tabela 1. Esses países, juntos, representam 34% do PIB mundial em 2023, totalizando US$ 36,8 trilhões.

| N.° | Países pré-selecionados | PIB em bilhões de dólares americanos (2023) | N.° | Países pré-selecionados | PIB em bilhões de dólares americanos (2023) |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | China | 18270,4 | 26 | Porto Rico | 118,4 |
| 2 | Índia | 3638,5 | 27 | Angola | 112,5 |
| 3 | Brasil | 2191,1 | 28 | Quênia | 108,2 |
| 4 | México | 1798,3 | 29 | Guatemala | 104,4 |
| 5 | Indonésia | 1371,2 | 30 | Uzbequistão | 102,6 |
| 6 | Turquia | 1153,3 | 31 | Venezuela | 102,4 |
| 7 | Argentina | 648,9 | 32 | Costa Rica | 86,5 |
| 8 | Tailândia | 515,9 | 33 | Croácia | 84,4 |
| 9 | Nigéria | 487,3 | 34 | Panamá | 83,8 |
| 10 | Bangladesh | 451,5 | 35 | Sri Lanka | 83,7 |
| 11 | Filipinas | 437,1 | 36 | Gana | 80,5 |
| 12 | Vietnã | 433,0 | 37 | Costa do Marfim | 79,6 |
| 13 | Irã | 421,5 | 38 | Tanzânia | 78,4 |
| 14 | Malásia | 399,9 | 39 | Uruguai | 78,0 |
| 15 | Egito | 393,8 | 40 | Azerbaijão | 72,4 |
| 16 | África do Sul | 381,3 | 41 | Congo | 67,4 |
| 17 | Paquistão | 336,6 | 42 | Turcomenistão | 62,8 |
| 18 | Peru | 271,8 | 43 | Mianmar | 62,3 |
| 19 | Iraque | 270,8 | 44 | Uganda | 52,0 |
| 20 | Cazaquistão | 261,8 | 45 | Jordânia | 51,2 |
| 21 | Argélia | 248,1 | 46 | Camarões | 49,3 |
| 22 | Etiópia | 159,8 | 47 | Tunísia | 48,5 |
| 23 | Marrocos | 146,1 | 48 | Bahrein | 46,2 |
| 24 | Equador | 121,1 | 49 | Bolívia | 45,5 |
| 25 | República Dominicana | 120,8 | 50 | Zimbábue | 44,4 |

**Tabela 1:** Lista de países em desenvolvimento e emergentes pré-selecionados. *Fonte: (IM, s.d.).*

Levando em conta as mudanças climáticas, a Perda Média Anual global em infraestrutura, incluindo edifícios, situa-se atualmente entre US$ 732 e US$ 845 bilhões, o que representa cerca de 14% do crescimento do PIB mundial em 2021-2022. As economias de baixa e média renda detêm cerca de metade desse passivo contingente (CDRI, 2023a). A Tabela 2 apresenta a composição do risco de infraestrutura a nível global, em termos dos principais setores de infraestrutura, em comparação com os mercados emergentes e em desenvolvimento. A Perda Média Anual global de US$ 751,4 bilhões, de acordo com o cenário climático atual, enquanto a Perda Média Anual para os países emergentes e em desenvolvimento é de US$ 308 bilhões. Os países emergentes e em desenvolvimento representam 34% do PIB mundial, mas 47% da Perda Média Anual global, o que indica um elevado nível de risco inerente à infraestrutura nessas economias.

| Setores de infraestrutura | % média anual global de perdas | % média anual de perdas dos países em desenvolvimento |
|---|---|---|
| Construções | 55,8 | 69,0 |
| Educação | 4,8 | 7,6 |
| Saúde | 0,1 | 0,1 |
| Petróleo e gás | 0,9 | 0,7 |
| Portos e Aeroportos | 2,0 | 1,1 |
| Energia | 14,3 | 10,0 |
| Estradas e ferrovias | 13,5 | 7,5 |
| Telecomunicações | 7,3 | 3,3 |
| Água e Esgoto | 1,3 | 0,6 |
| **Total geral** | **100,0** | **100,0** |

**Tabela 2:** Perda Média Anual por setor de infraestrutura. *Fonte: Análise dos dados do GIRI pelos autores (https://giri.unepgrid.ch/).*

Os países em desenvolvimento e emergentes (PDE) também apresentam um risco mais elevado no setor da construção, incluindo infraestruturas de educação e saúde, que representam 76% do total das Perdas Médias anuais (PMA). No que diz respeito aos setores críticos de infraestrutura, os setores de energia e transporte[4] represen-

4 O setor de transportes abrange estradas, ferrovias, portos e aeroportos.

tam 10% (US$ 31 bilhões) e 8,6% (US$ 23 bilhões) do total da PMA, o que é bastante significativo. O setor de transportes é complexo, com muitos componentes e subcomponentes em termos de ativos, redes e partes interessadas, o que torna a construção da resiliência uma tarefa colaborativa. O Quadro 1 apresenta medidas para promover a resiliência da infraestrutura de transporte.

**Quadro 1: Alcançando a resiliência do setor de transportes**

O setor de transportes representa US$ 90 trilhões e mais de 50% do valor total exposto das infraestruturas em todo o mundo, e enfrenta uma vulnerabilidade grave às perturbações climáticas. No Sul da Ásia, o setor de transportes contribui com 4% a 8% do PIB da região, e os ativos de transporte, avaliados em aproximadamente US$ 575 bilhões, estão expostos a riscos climáticos desde 2022. Esses riscos incluem danos físicos diretos, bem como interrupções nas redes de transporte. Uma falha na infraestrutura de transporte pode desencadear uma série de falhas em cadeia nos sistemas econômicos interconectados. Essas perturbações afetam as cadeias de abastecimento, a indústria e a produção econômica em geral. Diante das mudanças climáticas, sistemas de transporte resilientes são a base para a estabilidade e o crescimento econômicos.

**O CDRI e o BCG (2024) recomendam seis medidas para promover a resiliência da infraestrutura de transporte:**

- Elaborar planos de resiliência nacionais e subnacionais para alinhar medidas políticas entre setores, incluindo a infraestrutura de transporte, com metas mensuráveis.
- Incorporar avaliações de riscos climáticos na fase de pré-viabilidade de projetos de infraestrutura em áreas verdes e em áreas já ocupadas, a fim de integrar essas avaliações ao planejamento de infraestrutura.
- Estabelecer códigos e normas abrangentes para a infraestrutura de transporte, a fim de garantir a aplicação uniforme de medidas resilientes às mudanças climáticas em todos os projetos.
- Incorporar a resiliência nos processos de aquisição para projetos de infraestrutura.
- Incorporar a resiliência no desenvolvimento de competências para formar uma força de trabalho capacitada para projetar e gerenciar infraestruturas resilientes às mudanças climáticas por meio de módulos específicos.
- Aumentar a disponibilidade e o acesso ao financiamento para ampliar a implementação de projetos resilientes em infraestrutura de transporte por meio da inovação nas fontes e nos instrumentos de financiamento.

O terceiro setor crítico é o das telecomunicações, que representa 3,3% (US$ 10 bilhões) do total da Perda Média Anual (PMA) nos países emergentes e em desenvolvimento. É também um dos setores que registrará um aumento considerável nos investimentos, devido à crescente importância dos dados na era da economia digital e das infraestruturas de transferência e processamento de dados, para dar continuidade ao impulso crescente em Inteligência Artificial (IA) e Internet das Coisas (IoT). Embora a avaliação de riscos para o setor de telecomunicações ainda esteja em fase inicial, é importante que a resiliência seja incorporada à infraestrutura de telecomunicações existente e à que está por vir. O Quadro 2 apresenta detalhes sobre o Quadro de Avaliação do Risco de Desastres e da Resiliência (Disaster Risk and Resilience Assessment Framework – DRRAF) para o setor de telecomunicações.

**Quadro 2: Estrutura de Avaliação de Risco de Desastres e Resiliência (DRRAF) para o Setor de Telecomunicações**

**O CDRI, em parceria com o Departamento de Telecomunicações da Índia (Department of Telecommunications – DoT) e a Autoridade Nacional de Gestão de Desastres (National Disaster Management Authority – NDMA), desenvolveu um Quadro de Avaliação de Risco e Resiliência a Desastres (Disaster Risk and Resilience Assessment Framework – DRRAF), especificamente adaptado ao setor de telecomunicações, juntamente com um roteiro prático para as partes interessadas nesses níveis. O projeto adota uma abordagem em escala de sistema, abrangendo a conectividade da primeira milha, da meia milha e da última milha, sistemas de infraestrutura interconectados e uma variedade de opções tecnológicas em diferentes áreas geográficas (montanhas, planícies e regiões costeiras). O estudo propõe medidas de resiliência a desastres em cinco dimensões:** Planejamento e Projeto Técnico, Operações e Manutenção, Políticas, Instituições e Processos (PIPs), Arranjos Financeiros e Conhecimento Especializado. Esse quadro abrangente é, portanto, relevante para todos os países emergentes e em desenvolvimento.

O Índice de Resiliência a Desastres serve como uma matriz essencial para orientar as mudanças necessárias nas políticas, no planejamento e na concepção de infraestruturas, nos procedimentos operacionais, nas estratégias de manutenção, no fortalecimento de capacidades e nos investimentos financeiros. O índice incorpora dez indicadores-chave, incluindo boa governança, capacidade de aprendizagem, criatividade, flexibilidade, capacidade de resposta, redundância, robustez, fluxos de informação, falha segura e interdependência *(CDRI, 2025d)*

No que diz respeito aos riscos, a Tabela 3 compara o cenário global com o das economias emergentes e em desenvolvimento. Inundações, terremotos e ciclones destacam-se como os três riscos mais importantes, representando até 96% do total das perdas médias anuais (PMAs). Nos países em desenvolvimento e emergentes, os riscos de enchentes são consideravelmente maiores. As inundações dos últimos anos tornaram-se o risco mais devastador, causando prejuízos anuais de bilhões de dólares. Das 10 inundações mais devastadoras, 6 ocorreram entre 2010 e 2024, e os prejuízos totais causados pelos desastres chegaram a US$ 281 bilhões em 2023 (AON, 2024). As perdas relacionadas a inundações nos países emergentes e em desenvolvimento representam 66% do total das perdas médias anuais, totalizando US$ 203 bilhões (Tabela 3).

| Riscos | % média anual de perdas global | % média anual de perdas dos países em desenvolvimento |
|---|---|---|
| Ciclone | 14,9 | 10,6 |
| Terremoto | 26,7 | 19,9 |
| Inundação | 51,7 | 66,0 |
| Deslizamento de terra[5] | 4,9 | 2,6 |
| Tsunami | 1,8 | 0,9 |
| **Total geral** | **100,0** | **100,0** |

**Tabela 3: Perda Média Anual por tipo de risco: global e países em desenvolvimento e emergentes.** *Fonte: Análise dos dados do GIRI pelos autores (https://giri.unepgrid.ch/).*

A Figura 3 mostra a distribuição dos danos causados pelas inundações por setor, e fica claramente visível que as inundações são, de fato, o risco mais devastador nos países em desenvolvimento e emergentes, embora seu impacto nos diversos setores não seja o mesmo. Por exemplo, no setor de portos e aeroportos, mais de 70% da Perda Média Anual é causada por ciclones, enquanto até 60% da

5 O GIRI avalia os riscos de deslizamentos de terra exclusivamente no setor de estradas e ferrovias. Portanto, as perdas em infraestrutura decorrentes de deslizamentos de terra podem estar subestimadas.

Perda Média Anual no setor de água e esgoto é causada por terremotos. Para o setor elétrico, terremotos e ciclones são tão devastadores quanto as enchentes, representando até 50% da Perda Média Anual do setor. Portanto, é pertinente que as abordagens setoriais para integrar a resiliência se concentrem nos riscos mais relevantes para um determinado setor. 30% das perdas médias anuais do setor elétrico, que totalizam US$ 9,6 bilhões, são causadas por ciclones. A Quadro 3 apresenta algumas recomendações e medidas para reforçar a resiliência do setor elétrico contra ciclones.

**Quadro 3: Aumentar a resiliência do setor elétrico diante de eventos climáticos extremos**

Um estudo detalhado realizado pelo CDRI e pela GRIDCO (2024) no estado de Odisha, na Índia, recomenda que as partes interessadas sigam estas etapas para aumentar a resiliência do setor elétrico diante de eventos climáticos extremos, como ciclones tropicais.

- Atualizar os códigos e normas de construção para a infraestrutura de transmissão e distribuição.
- Atualizar os mapas de zoneamento eólico e instalar anemômetros nas subestações de energia.
- Acompanhar dados históricos para aumentar a resiliência sistêmica.
- Criar plataformas de acesso a dados sobre riscos climáticos físicos
- Incorporar o componente de "resiliência" em todos os marcos normativos, incluindo medidas não estruturais
- Desenvolver um quadro intersetorial para reforçar a colaboração entre as partes interessadas e implementar programas de treinamento para uma preparação eficaz para desastres
- Aproveitar mecanismos inovadores de seguro, avaliar as implicações das cláusulas de força maior, reexaminar os passivos contingentes e outras obrigações contratuais

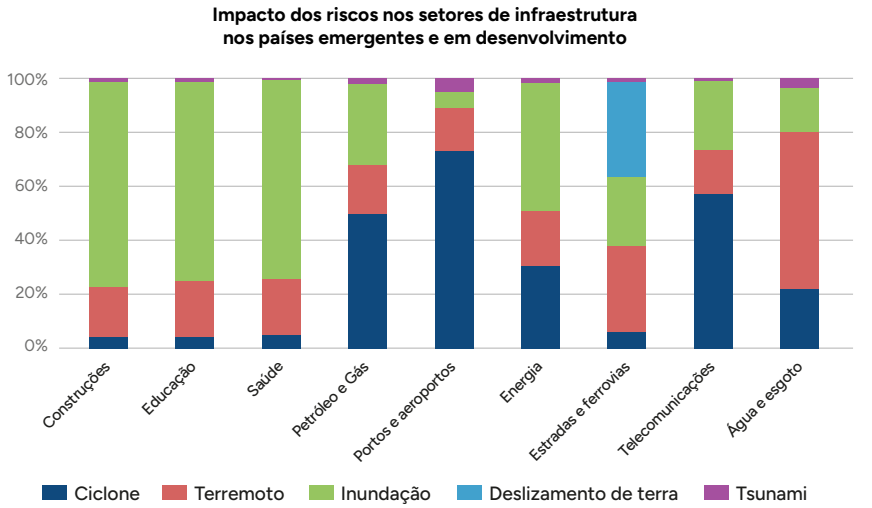



**Figura 3:** Impacto dos riscos nos setores de infraestrutura nos países emergentes e em desenvolvimento. *Fonte: Análise dos dados do GIRI pelos autores (https://giri.unepgrid.ch/).*

A nível regional, nos países emergentes e em desenvolvimento, há muitas diferenças na forma como a Perda Média Anual se distribui. A África representa 2,2%, mesmo com 16 países na lista, o que deixa claro que existe um enorme déficit de infraestrutura nos países africanos; isso também constitui uma oportunidade oportuna para incorporar a resiliência, já que a maior parte da infraestrutura necessária ainda precisa ser construída. A Ásia, com seus 20 países, representa 83% do total das perdas médias anuais, com 77% do PIB, o que se traduz em um grande passivo contingente, na necessidade de modernizar a infraestrutura existente e na necessidade de investir em novas infraestruturas. A região abrange duas das maiores economias do mundo, a Índia e a China, que, juntas, representam 58% do total da Perda Média Anual e 59% do PIB dos países emergentes e em desenvolvimento. Nove países da América do Sul e do Caribe representam 9% da Perda Média Anual, sendo que o Brasil responde por 60% do PIB e 47% da Perda Média Anual.

Portanto, o aumento da resiliência das infraestruturas na Índia, na China e no Brasil tem o potencial de beneficiar um grande número de pessoas e de impulsionar o crescimento econômico.

| Região | Número de países | Perda Média Anual (em milhões de dólares) | % Perda Média Anual | PIB (2023, bilhões de dólares) | % do PIB |
|---|---|---|---|---|---|
| África | 16 | 6722 | 2,2 | 2537 | 6,9 |
| Ásia | 20 | 256546 | 83,2 | 28443 | 77,2 |
| América do Sul e Caribe | 9 | 28960 | 9,4 | 3666 | 10,0 |
| Outros[6] | 5 | 16159 | 5,2 | 2189 | 5,9 |
| **Total geral** | **50** | **308387** | **100,0** | **36835** | **100,0** |

**Tabela 4:** Panorama regional dos riscos de infraestrutura.

Além da África, que apresenta uma Perda Média Anual mais baixa e uma Perda Média Anual Relativa mais elevada, os Pequenos Estados Insulares em Desenvolvimento (PEID) também dispõem de menos infraestruturas e apresentam uma vulnerabilidade muito maior. Os PEID estão sofrendo impactos mais graves das mudanças climáticas, e suas infraestruturas e serviços já existentes estão sob ameaça ainda maior. O Quadro 4 apresenta o panorama dos riscos de infraestrutura na África e nos PEID.

6 Outros representam cinco países, a saber: a Croácia na Europa, o México na América do Norte e a Guatemala, o Panamá e Porto Rico na América Central.

**Quadro 4: Resiliência das infraestruturas na África e nos Pequenos Estados Insulares em Desenvolvimento (PEID)**

O CDRI (2025b, 2025c) dedica especial atenção aos países da África e aos Pequenos Estados Insulares em Desenvolvimento (PEID) que não apresentam uma Perda Média Anual muito elevada, mas sim uma Perda Média Anual Relativa mais elevada. Esses documentos de trabalho abordam a análise de riscos de infraestrutura para todos os 55 países da África e os 55 países e territórios PEID.

Existem também diferenças inerentes entre os riscos de infraestrutura em nível global por setor na África e nos PEID. Por exemplo, nos PEID, o setor de telecomunicações registra a maior Perda Média Anual, com US$ 589 milhões, seguido de perto pelo setor de energia, com US$ 536 milhões. Essa vulnerabilidade é agravada pela dependência de redes rodoviárias únicas, sistemas centralizados de geração de energia e infraestrutura portuária limitada. As ilhas do Caribe apresentam uma Perda Média Anual mais elevada, enquanto as ilhas do Pacífico e as regiões AIMS (África, Oceano Índico, Mediterrâneo e Mar da China Meridional) registram perdas médias anuais consideravelmente mais baixas, mas enfrentam riscos relativos maiores devido à capacidade fiscal limitada e à elevada exposição a riscos.

Na África, os países menores, com menos infraestrutura, sofrem perdas significativas em suas economias quando a Perda Média Anual é comparada ao seu PIB. A Perda Média Anual representa 1,5% do PIB do Lesoto, 1,25% do PIB das Ilhas Maurício e 1% do PIB das Comores. Entre os setores de infraestrutura, o setor elétrico apresenta a maior Perda Média Anual, de US$ 844 milhões, seguido pelo setor de telecomunicações, com US$ 418 milhões, e pelo setor de rodovias e ferrovias, com US$ 282 milhões. Na África, os países com a maior Perda Média Anual em infraestrutura e edifícios são a África do Sul (US$ 1,7 bilhão), a Nigéria (US$ 1,1 bilhão) e a Argélia (US$ 1 bilhão). Esses são valores elevados que os governos africanos precisam arcar anualmente para a reparação e reconstrução das infraestruturas danificadas. A África não pode arcar com essas perdas.

A Perda Média Anual (PMA) é um indicador financeiro da perda provável de ativos e será sempre menor para países que não possuem muitos ativos de infraestrutura, embora isso não signifique que tais países sejam menos vulneráveis. Os países com menos ativos podem estar muito mais expostos a riscos em comparação com os países que possuem um número maior de ativos. Portanto,

para esses países, a Perda Média Anual (PMA) relativa é um indicador importante, que corresponde à relação entre a Perda Média Anual e o valor exposto dos ativos. Os países com menos ativos podem apresentar uma Perda Média Anual mais baixa e uma Perda Média Anual Relativa alta. A Figura 4 mostra a Perda Média Anual em comparação com a Perda Média Anual Relativa em todos os países emergentes e em desenvolvimento. A maioria dos países da África não apresenta uma Perda Média Anual muito elevada, mas sim uma Perda Média Anual relativamente alta, comparados aos da América do Sul. Países sul-americanos como o Equador e a Bolívia podem não apresentar uma Perda Média Anual muito elevada, mas suas perdas médias anuais relativas são comparáveis às de países como a Índia e a China.

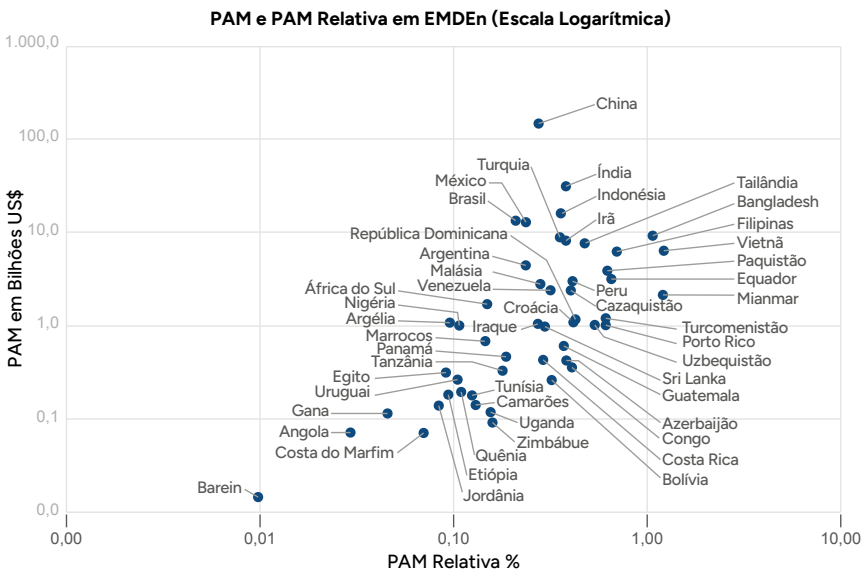



**Figura 4:** AAL and Relative AAL in EMDEs. Perda Média Anual (PMA) e Perda Média Anual Relativa (PMA Relativa) nos países emergentes e em desenvolvimento. *Fonte: Análise dos dados do GIRI pelos autores (https://giri.unepgrid.ch/).*

Por isso, é importante que os países em desenvolvimento e emergentes se comprometam a reforçar suas capacidades de absor-

ver os impactos de desastres, investindo em novas infraestruturas resilientes às mudanças climáticas e aos desastres, institucionalizando avaliações de risco e adotando novas normas e códigos. Os países em desenvolvimento com maior Perda Média Anual Relativa terão de investir também na modernização dos ativos existentes para reduzir seus passivos contingentes. A elevada vulnerabilidade climática, aliada à necessidade de investir em infraestrutura e no crescimento econômico, cria uma oportunidade para que os países emergentes e em desenvolvimento incorporem a resiliência em suas políticas.

A última seção deste capítulo apresenta uma lista abrangente das principais lições e recomendações que ajudarão os países emergentes e em desenvolvimento a alcançar a resiliência das infraestruturas diante de desastres e a colher os benefícios dessa resiliência.

## COLHENDO OS FRUTOS DA RESILIÊNCIA: ALCANÇANDO A DRI NOS MERCADOS EMERGENTES E EM DESENVOLVIMENTO

A discussão a seguir apresenta sete lições práticas fundamentais para que os países e os governos possam colher os benefícios da resiliência por meio do fortalecimento da resiliência dos sistemas de infraestrutura.

### É fundamental compreender melhor os riscos.

A avaliação dos riscos de infraestrutura é o primeiro passo para viabilizar ações de DRI. As avaliações de risco podem fornecer aos governos e aos ministérios responsáveis pela infraestrutura a base de evidências necessária para obter uma visão geral dos riscos em diversos setores e orientar políticas e decisões de investimento nos níveis nacional e subnacional, conforme discutido com mais detalhes na última seção. Avaliações detalhadas em nível local podem ajudar as agências de desenvolvimento de infraestrutura, concessionárias de serviços públicos, operadores de ativos e agên-

cias de gestão de riscos de desastres a planejar a manutenção e as reformas, construir novos ativos resilientes e orientar a reconstrução pós-desastre.

### Investir em infraestrutura resiliente pode ajudar a minimizar os custos macroeconômicos indiretos.

Falhas na infraestrutura e interrupções nos serviços decorrentes de desastres podem afetar o comércio e o turismo, prejudicar empregos e meios de subsistência e gerar despesas com reconstrução, prejudicando o desenvolvimento. A análise macroeconômica do CDRI sobre oito países distintos em diferentes regiões mostra que as perdas econômicas indiretas decorrentes de falhas na infraestrutura são, em média, 7,4 vezes maiores do que os custos diretos dos ativos danificados e podem chegar a 16 vezes em alguns países (CDRI, 2025a). Na verdade, as falhas na infraestrutura podem causar uma Perda Média Anual de cerca de 5,2% do crescimento do PIB entre 2025 e 2050.

A análise mostra, ainda, que a velocidade da recuperação e da reconstrução influencia diretamente as consequências econômicas das falhas na infraestrutura decorrentes de desastres, com o impacto médio no PIB caindo de 7,4% no caso de uma reconstrução lenta e parcial para 3% com uma reconstrução completa ao longo de dez anos, podendo ser reduzido ainda mais para 2,3% se a reconstrução for concluída em quatro anos (CDRI, 2025a). Essa análise ressalta que investir no desenvolvimento de infraestruturas resilientes e na rápida reconstrução pós-desastre é, de fato, uma importante estratégia econômica para que os países em desenvolvimento restaurem sua capacidade produtiva e limitem a magnitude dos impactos cumulativos.

### Para fortalecer a resiliência das empresas, é necessário adotar uma perspectiva da cadeia de valor e um envolvimento mais profundo.

Além dos impactos diretos em ativos físicos, como fábricas e edifícios, os efeitos em cadeia dos desastres podem interromper as operações comerciais e as cadeias de abastecimento devido a

danos em sistemas de infraestrutura essenciais e falhas nos serviços. Essas perturbações podem afetar as estruturas de emprego e a rentabilidade, com os lucros médios anuais podendo sofrer uma redução de até 15% (BCG, 2023).

Uma pesquisa recente do CDRI com mais de 500 empresas de cerca de 60 países indica que, embora 82% das grandes empresas afirmem possuir planos de continuidade, apenas metade desses planos foi testada, e cerca de 60% ainda dependem de respostas pontuais. A pesquisa também revelou que, embora a penetração dos seguros seja elevada entre as grandes empresas, mais de 40% delas não possuem cobertura suficiente para desastres, e até 77% consideram que as políticas governamentais de resiliência são inexistentes ou mal aplicadas (CDRI, 2025a).

Esses resultados destacam a crescente vulnerabilidade das empresas, os investimentos insuficientes em resiliência e a necessidade de fortalecer as capacidades e o envolvimento do governo. Além disso, a resiliência de ponta a ponta das empresas exige uma visão da cadeia de valor para reduzir o tempo de inatividade e as vulnerabilidades sistêmicas, a fim de minimizar os impactos indiretos em cascata.

### As tecnologias oferecem oportunidades transformadoras.

Inovações tecnológicas, como casas resilientes impressas em 3D, satélites em órbita baixa da Terra e inteligência artificial, já estão sendo amplamente utilizadas para projetar, construir e manter ativos de infraestrutura. A análise do CDRI sobre mais de 35 novas tecnologias e 100 estudos de caso em todo o mundo, realizada como parte do relatório GIR 2025, mostra que essas ferramentas transformarão radicalmente as infraestruturas resilientes na próxima década (Stone, 2025).

Entre uma ampla gama de aplicações orientadas para o DRI, as tecnologias podem ser aproveitadas principalmente para aprimorar a cadeia de valor dos dados, melhorar a conectividade, a comunicação e a colaboração, e fortalecer os ativos de infraestrutura e o desempenho da rede (Figura 5). Por exemplo, a Defesa Civil do Brasil utilizou um painel online para monitorar e divulgar

os impactos do desastre no Rio Grande do Sul[7]. Na Índia, um sistema baseado em inteligência artificial que personaliza os alertas de ciclones para cada família, utilizando dados sobre o tipo de residência, localização e exposição a riscos, foi implementado antes da chegada do ciclone Yaas em 2021 (Ajmal, 2021)

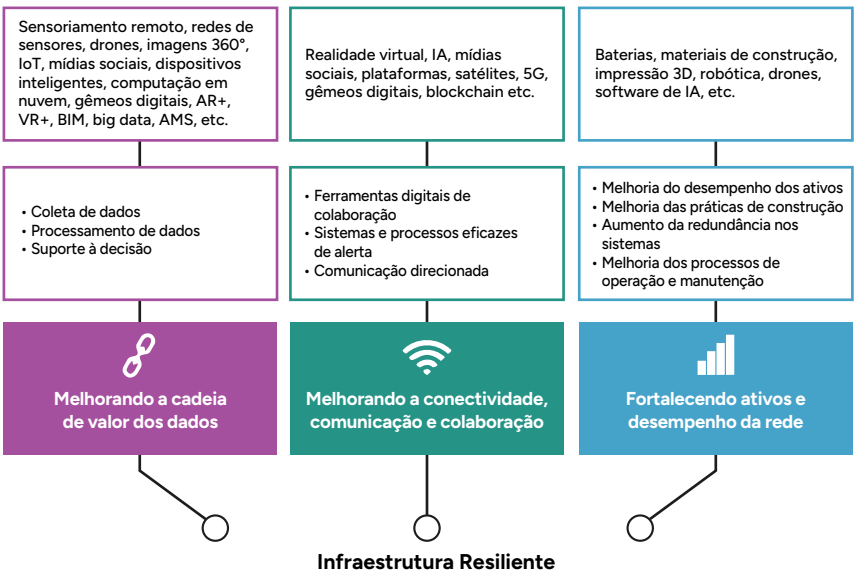



**Figura 5:** Tecnologias para infraestruturas resilientes. *Fonte: Stone, 2025.*

O custo das novas tecnologias costuma ser uma fração do custo das interrupções nos serviços de infraestrutura, uma vez que elas podem reduzir os custos de construção e manutenção dos ativos de infraestrutura; ajudar a aumentar a capacidade de absorver choques e, assim, evitar perdas; e permitir uma recuperação e reconstrução mais rápidas após a ocorrência de eventos. No entanto, os benefícios das novas tecnologias para a resiliência só serão tão eficazes quanto as competências técnicas dos usuários e as capacidades institucionais dos órgãos responsáveis pela implementação e dos operadores de infraestrutura para aproveitar todo o seu potencial. Estruturas regulatórias claras, normas e

7 Mais informações disponíveis em https://sosenchentes.rs.gov.br/inicial.

incentivos para a aplicação dos resultados tecnológicos também são fundamentais. Além disso, o fortalecimento da resiliência da infraestrutura não precisa necessariamente envolver tecnologia de ponta. Soluções simples e acessíveis, como aplicativos móveis para manutenção ou comunicação com as comunidades, podem ser igualmente eficazes.

### A ampliação de soluções inovadoras, como as Soluções Baseadas na Natureza SbN, pode proporcionar resiliência com boa relação custo-benefício.

As SbN para reforçar a resiliência das infraestruturas custam, em geral, 50% menos inicialmente do que as soluções convencionais e geram um valor adicional de 28% (CDRI, 2025a).

Além de amortecer os impactos, as SbN também pode manter funções essenciais durante um desastre e facilitar uma rápida recuperação. Por exemplo, as florestas podem servir como rotas de evacuação, as zonas úmidas podem reter as águas das enchentes e as barreiras verdes podem ser utilizadas para mitigar ondas de calor ou enchentes. Além disso, as SbN também oferecem benefícios de longo prazo, incluindo ar mais puro e áreas de lazer, bem como uma economia local robusta, o que pode ser alcançado a um custo menor em comparação com a infraestrutura tradicional.

No entanto, a ampliação das SbN — passando de projetos-piloto para a implementação em larga escala — normalmente requer a combinação de soluções cinzentas, verdes e azuis, ou "soluções híbridas", que integram a previsibilidade das soluções de engenharia com a adaptabilidade e as qualidades regenerativas da natureza. Um exemplo frequentemente citado é o Programa "Espaço para o Rio" da Holanda, que utiliza um sistema complexo de soluções híbridas para aumentar a resiliência às inundações (European Climate-ADAPT, 2020).

Além disso, sua implementação, manutenção e reabilitação exigem capacidade técnica e o envolvimento de diversos setores e atores, incluindo órgãos de infraestrutura e comunidades locais. A integração em planos diretores, estratégias setoriais, procedimentos de licitação, manuais de projeto, ferramentas e contratos

de concessão, além de instrumentos financeiros bem concebidos, pode ajudar a alinhar os incentivos tanto para os atores públicos quanto para os privados (CDRI, 2025a).

## O financiamento de infraestruturas resilientes requer uma abordagem em várias camadas.

O acesso a financiamento adequado é indispensável para a implementação das estratégias de DRI. Atualmente, o financiamento para a RRD é, em grande parte, reativo, sendo disponibilizado somente após os desastres causarem danos generalizados, o que deixa muitos países, especialmente as economias em desenvolvimento, com lacunas de financiamento persistentes. Estima-se que, somente os países de renda baixa e média (PIRM) enfrentem um déficit de investimento anual de cerca de US$ 3 trilhões para adaptar e modernizar infraestruturas envelhecidas, de modo a torná-las neutras em carbono e resilientes, capazes de resistir aos impactos climáticos (CDRI, 2023a).

Ao mesmo tempo, as falhas nas infraestruturas decorrentes de desastres não só causam grandes impactos econômicos, como também aumentam o peso da dívida pública e reduzem as classificações de risco de um país. Portanto, é fundamental quantificar os benefícios diretos e indiretos da resiliência por meio de ferramentas de avaliação de riscos e de análise de custo-benefício — ao tomar decisões de investimento para o desenvolvimento de novas infraestruturas, a manutenção e a modernização de ativos existentes e a reconstrução pós-desastre.

Além disso, o financiamento de infraestruturas resilientes requer uma gama de instrumentos capazes de absorver, responder e recuperar-se dos impactos de desastres, tais como uma combinação de rubricas orçamentárias específicas para resiliência, orçamentos contingentes e empréstimos, seguros e acesso rápido a doações internacionais e crédito em condições favoráveis (Figura 6). Ao mesmo tempo, uma governança sólida, normas claras de resiliência e a integração de considerações sobre o risco de desastres nas decisões dos setores público e privado — nos níveis nacional e subnacional — são necessárias para garantir que esses investimentos alcancem o máximo de eficácia.

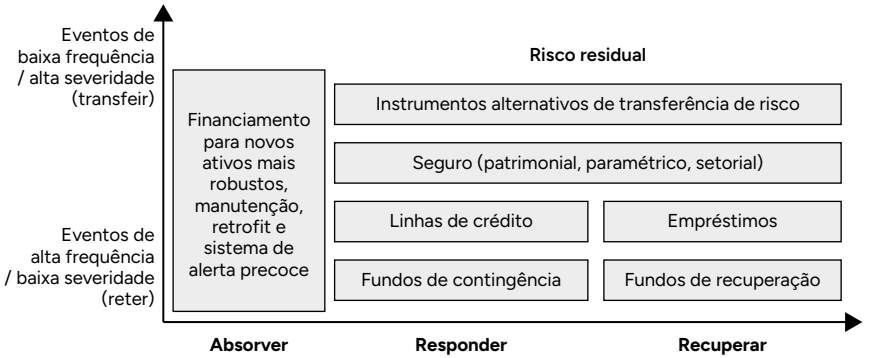



**Figura 6:** Panorama dos instrumentos financeiros para a resiliência das infraestruturas. *Fonte: CDRI, 2025a.*

## O fortalecimento das capacidades institucionais e da governança é indispensável.

A DRI é, essencialmente, um desafio de governança e requer uma ação coordenada entre setores, órgãos e níveis de governo. Essa responsabilidade não recai apenas sobre as agências de infraestrutura; os ministérios da Fazenda, os órgãos de planejamento, as autoridades responsáveis pelo uso do solo, os governos subnacionais, os legisladores e outros prestadores de serviços desempenham um papel fundamental, além das comunidades locais e das empresas, ao integrar a resiliência em seus próprios mandatos e funções ao longo de todo o ciclo de resiliência da infraestrutura.

A colaboração entre as agências de infraestrutura e as autoridades responsáveis pela gestão de desastres também é fundamental. Planos integrados de preparação, simulados, sistemas de alerta precoce e a rápida reconstrução de infraestruturas resilientes só podem ser eficazes quando a governança é clara e as atribuições são inequívocas. No entanto, estruturas fragmentadas, sobreposição de responsabilidades e lacunas nas capacidades institucionais e humanas continuam sendo os principais obstáculos à ação em matéria de DRI e a uma resposta e recuperação eficazes.

Para compreender melhor essas lacunas, o CDRI realizou uma Pesquisa Global sobre Resiliência de Infraestrutura, que abrangeu mais de 3.000 profissionais em mais de 100 países, como

parte do relatório GIR 2025. Os resultados revelam que muitos países enfrentam escassez de pessoal qualificado, financiamento limitado e responsabilidades fragmentadas. Por exemplo, entre os 3.000 profissionais entrevistados em todo o mundo, quase 40% dos entrevistados relatam que a capacidade do setor público é insuficiente, com apenas 12% a 15% indicando o uso consistente de novas tecnologias e soluções inovadoras, como as SbN. Embora as capacidades do setor privado sejam frequentemente mais sólidas, apenas cerca de um terço dos entrevistados as considerou suficientes. Além disso, o fortalecimento de políticas, normas, códigos e regulamentações surgiu como a medida mais importante que os governos podem adotar para melhorar a resiliência (CDRI, 2025a).

Tendo em conta alguns desses desafios, surgiram recentemente várias iniciativas em todo o mundo. A infraestrutura resiliente tem sido uma área-chave de foco político no âmbito dos recentes compromissos do G20 e do BRICS, das Conferências das Partes (COPs) da UNFCCC e das plataformas globais e regionais da UNDRR. A OCDE e o Grupo do Banco Mundial, com o apoio de outros bancos multilaterais de desenvolvimento, elaboraram os Princípios de Investimento em Infraestrutura de Qualidade (QII) para orientar países e investidores a garantir que os investimentos em infraestrutura não sejam apenas financeiramente viáveis, mas também social, ambiental e economicamente sustentáveis.

O CDRI, por meio de seus mais de 60 países membros e parceiros, tem envidado esforços constantes para promover a agenda da DRI, contribuindo e impulsionando o debate político global e apoiando os governos na implementação dessas iniciativas por meio de assistência técnica e apoio programático. O desenvolvimento de capacidades por meio do compartilhamento de conhecimentos práticos e recursos — na forma de pesquisas de ponta, estudos de caso, ferramentas e treinamento — é uma área de foco fundamental para o CDRI, com o objetivo de ajudar governos, instituições e partes interessadas a desenvolver, implementar e ampliar infraestruturas resilientes aos riscos climáticos e de desastres.

## REFERÊNCIAS


Ajmal, A. (2021, October 20). This non-profit is protecting vulnerable communities from the effects of climate change with AI. *Source Asia*. This non-profit is protecting vulnerable communities from the effects of climate change with AI - Source Asia

AON. (2024). *2024 Climate and Catastrophe Insight*. https://assets.aon.com/-/media/files/aon/reports/2024/climate-and-catastrophe-insights-report.pdf

Boston Consulting Group (BCG). (2023). *Coming to grips with corporate climate risk*. The Boston Consulting Group. https://web-assets.bcg.com/b4/78/8a615ed64cc496596f7c223cbc96/bcg-coming-to-grips-with-corporate-climate-risknov-2023-1.pdf

CDRI. (2023a). *Global Infrastructure Resilience: Capturing the Resilience Dividend- A Biennial Report from the Coalition for Disaster Resilient Infrastructure*. New Delhi. https://driconnect.cdri.world/resources/cdri-publications/biennial-report-on-global-infrastructure-resilience-capturing-the-resilience-dividend

CDRI (2023b). *DRI Lexicon – Shared understanding of terms that matter for Disaster Resilient Infrastructure*. Coalition for Disaster Resilient Infrastructure, New Delhi, India. https://doi.org/10.59375/cdri1001, https://lexicon.cdri.world/

CDRI and GRIDCO. (2024). *Policy Brief - Lessons from Odisha: Developing Power Sector Resilience to Extreme Weather Events in Coastal Areas*. https://driconnect.cdri.world/resources/cdri-publications/power-sector-policy-brief-odisha

CDRI and Prayas. (2025). *Navigating the Indian Power Sector in the Face of Extreme Heat*. https://driconnect.cdri.world/resources/cdri-publications/navigating-the-indian-power-sector-in-the-face-of-extreme-heat-a-scoping-note

CDRI and BCG. (2024). *Transport Infrastructure Reimagined: Forging Resilient Connections*. https://driconnect.cdri.world/

resources/cdri-publications/transport-infrastructure-reimagined-forging-resilient-connections

CDRI. (2025a). *Global Infrastructure Resilience 2025: Capturing the Resilience Dividend.* New Delhi. https://driconnect.cdri.world/images/resources/MainReport_GIR_2025._709102968.pdf

CDRI. (2025b). *Infrastructure Resilience in Africa: GIR-2025 Working Paper*. New Delhi. https://driconnect.cdri.world/resources/cdri-publications/infrastructure-resilience-in-africa

CDRI. (2025c). *Infrastructure Resilience in Small Island Developing States: GIR-2025 Working Paper*. New Delhi. https://driconnect.cdri.world/resources/cdri-publications/gir-2025-sids

CDRI. (2025d). *Policy Brief: National and sub-national disaster risk & resilience assessment and roadmap for telecommunication sector, India.* New Delhi. https://driconnect.cdri.world/resources/cdri-publications/telecom-policy-brief

Centre for Research on the Epidemiology of Disasters (CRED). (2025). *2024 Disasters in Numbers*. CRED. https://files.emdat.be/reports/2024_EMDAT_report.pdf

European Climate-ADAPT. (2020). *Room for the River Waal – Protecting the city of Nijmegen*. https://climate-adapt.eea.europa.eu/en/metadata/case-studies/room-for-the-river-waal-2013-protecting-the-city-of-nijmegen

IMF. (n.d.). Real GDP growth. Retrieved February 1, 2025, from https://www.imf.org/external/datamapper/NGDPD@WEO/OEMDC/ADVEC/WEOWORLD

Hallegatte,S., Rentschler, J.; Rozenberg, J. (2019). *Lifelines: The Resilient Infrastructure Opportunity. Sustainable Infrastructure*, Washington, D.C.: World Bank. http://hdl.handle.net/10986/31805

McKinsey & Company. (2025). *The Infrastructure Moment: Investing in the Expanding Foundations of Modern Society.* https://www.mckinsey.com/~/media/mckinsey/industries/infrastructure/our%20insights/the%20infrastructure%20

moment/the-infrastructure-moment-investing-in-the-expanding-foundations-of-modern-society.pdf

Stone, H. (2025). *GIR 2025 Working Paper on Technologies: Harnessing the Full Potential. Coalition for Disaster Resilient Infrastructure (CDRI).* https://cdri.world/resilience-dividend/global-infrastructure-resilience-report-second-edition/.

United Nations (UN). (2024). *The Sustainable Development Goals Report 2024.* https://unstats.un.org/sdgs/report/2024/

UNDRR. (2025). *Global Assessment Report on Disaster Risk Reduction 2025.* https://www.undrr.org/media/106862/download?startDownload=20260208

World Bank. (n.d.). Gross Fixed Capital Formation (Current US$) Retrieved February 1, 2025, from https://data.worldbank.org/indicator/NE.GDI.FTOT.CD?end=2024&start=1960&view=chart.

**Endereço eletrônico:**

https://giri.unepgrid.ch/

13

# CLIMATE AND DISASTER RESILIENT INFRASTRUCTURE IN EMERGING AND DEVELOPING ECONOMIES: RISKS, CHALLENGES AND OPPORTUNITIES

ABHIJIT DATEY,
RAINA SINGH,
AND AISHWARYA RAJ[1]

## THE NEED FOR CLIMATE AND DISASTER RESILIENT INFRASTRUCTURE (DRI)

Infrastructure enables a well-functioning society by supporting its key socio-economic functions. It is also a key driver of economic growth, and hence most emerging market and developing economies (EMDEs) put a high impetus on infrastructure investment. In the year 2024, Gross Fixed Capital Formation (GFCF), which indicates investment in fixed assets, reached $29 trillion from just $723 billion in 1970 (World Bank, n.d.), which indicates that there has been massive infrastructure investment across the globe to support economic growth and urbanisation. It is also important to note that more than 90 per cent of the glo-

1 This chapter is contributed by the Coalition for Disaster Resilient Infrastructure (CDRI), headquartered in New Delhi, India. CDRI is a coalition of 53 countries and 12 international organizations, and the private sector. CDRI is dedicated to enhancing the resilience of infrastructure systems to climate and disaster risks. Its members benefit from access to global expertise, funding, technical support, research opportunities, innovative solutions, and international best practices. More information is available on www.cdri.world

DOI: 10.66949/y8f3n6k2

bal infrastructure has been built in the last 50 years alone, and most of the infrastructure that will be required by 2050 is yet to be built (CDRI,2023a).

An estimate suggests that cumulative infrastructure investment is expected to reach as high as $106 trillion by 2040. Of those, a major share of $61 trillion will be of transport and energy infrastructure. Two-thirds of this infrastructure investment will be received by Asia, which has the major developing economies of the world experiencing rapid industrialisation, urbanisation, and population growth. As urbanisation also concentrates a large number of people in a relatively smaller geographic area, disaster risks are concentrated. Urbanization is creating exceptionally high demand in Africa and South Asia, especially for public transit systems, utilities, and digital connectivity (McKinsey, 2025). Apart from constructing infrastructure for the future, about $9.2 trillion of annual investment will be required to address currently existing infrastructure deficits and achieve the Sustainable Development Goals (SDGs). Most of this investment will be necessary in low- and middle-income countries (LMICs), although it is still substantially lower than in the middle- and high-income countries (MHICs) (CDRI, 2023a).

On one hand, investment in infrastructure is growing across the world, but on the other hand, infrastructure losses to existing assets are growing exponentially, eroding investments. Global Infrastructure losses estimated as Average Annual Loss (AAL) due to climate and geo-hazards are estimated to be above 700 billion (CDRI, 2023a), although this is only an estimation of asset loss and does not paint the entire picture. Global costs of damages due to disasters are about $2.3 trillion annually when indirect and ecosystem impacts are included (UNDRR,2025). CDRI's Global Infrastructure Resilience (GIR) 2025 report points out that countries such as the Philippines, Bangladesh, and Barbados may lose more than 8 per cent of their GDP to disaster losses between 2025 and 2050. It also states that indirect costs incurred by infrastructure failures due to disasters are more than seven times higher than the costs of the direct damage to the infrastructure itself. These indirect economic costs include everything from interrup-

tions in trade to lost jobs and livelihood opportunities. In addition to it, the economic losses due to disruptions of services such as electricity or water are much higher than the direct damage to assets (CDRI, 2025a). The hazard risk scenario is also changing with the impacts of climate change. Hazards such as tropical cyclones, floods, and wildfires are becoming more intense, and new emerging hazards, such as extreme heat, the impacts of which are less studied and are being researched. Risk to infrastructure assets increases due to more frequent or intense hazard events. Data from the Emergency Events Database (EM-DAT) indicates that, in 2024, recorded disaster events reached 393, above the previous two-decade annual average, and direct economic losses surged to over $240 billion (CRED, 2025). More recently, in 2025, extreme events such as Cyclone Remal in South Asia, floods in Bolivia, and Hurricane Melissa demonstrate that infrastructure damage goes far beyond physical destruction, disrupting markets, livelihoods, and essential services.

As the costs of disasters have been under-estimated, so have been the benefits of investing in disaster risk reduction and disaster resilient infrastructure (DRI). Hallegatte *et al.* (2019) demonstrate that investing in resilient infrastructure in low- and middle--income countries yields $4 in benefits for every $1 invested – with a total net benefit of $4.2 trillion. CDRI (2023a) refers to it as the "resilience dividend," which is defined as the full range of benefits possible from investing in infrastructure resilience. These include avoided asset loss, reduced service disruption, improved quality and reliability of public services, accelerated economic growth and social development, reduced carbon emissions, enhanced biodiversity, improved air and water quality, and more efficient land use (CDRI, 2023a). It is only possible to reap this resilience dividend if resilience is embedded in the entire lifecycle of an infrastructure project, all the way from planning and designing, financing, commissioning, operating, and maintaining.

Resilience is the ability of societies to withstand, adapt to, and recover from disruptions—whether caused by natural hazards, climate change, or systemic shocks—and determines the pace and equity of global progress. Resilient infrastructure lies at the heart of

achieving sustainable development goals, climate adaptation, and inclusive growth (UNDRR, 2025). CDRI (2023b) defines disaster-resilient infrastructure as

> *infrastructure systems and networks, the components, and assets thereof, and the services they provide, that are able to resist and absorb disaster impacts, maintain adequate levels of service continuity during crises, and swiftly recover in such a manner that future risks are reduced or prevente.*

Infrastructure is not just a collection of individual assets but also a network of connected assets that collectively provide services to individuals, communities, businesses, and the economy. The resilience of these networks and services depends on their capacity to i) resist and absorb the shocks caused by disasters impacts; ii) respond to the damages caused by those disasters and maintain basic levels of service continuity during crises; and iii) restore services as quickly as possible in a way that incorporates lessons learned from the disaster and reduces future loss and damage. At these three levels (infrastructure assets, services, and users), resilience should be seen not only as the capacity to absorb the next disaster but also as the ability to respond to and recover from it. Building resilience in infrastructure assets and systems requires a comprehensive view of the resilience cycle and timely incorporation of lessons learnt to reduce future losses and damage, and "build back better".

Building the resilience of infrastructure systems requires agencies and asset managers to strengthen not only the capacity to absorb disasters but also the ability to respond to shocks and recover quickly. Figure 1 shows the resilience-building framework that strengthens the three capacities and could be applied at the level of an individual infrastructure asset, as well as to infrastructure networks and their users. It also provides a graphical representation of the resilience dividend.

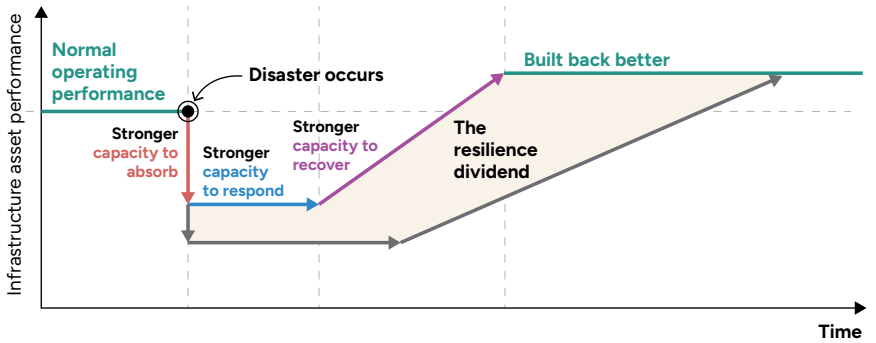



**Figure 1:** DRI Framework and the three capacities for resilient infrastructure. *Source: CDRI, 2025a.*

Figure 1 also represents the nature of these three capacities with respect to asset performance and time.

- The capacity to absorb is a sudden loss in performance or in the capacity to provide services owing to the loss and damage experienced after a hazard event. For example, earthquake-resilient buildings, levees, storm-hardened power lines, fire-retardant materials, and roads and bridges that stay intact in the face of disasters and help an asset to absorb the impacts.
- The capacity to respond is when an infrastructure asset or network can respond faster to any impacts of disasters. This capacity is time sensitive. The lesser the time response takes, the larger the resilience dividend, which is represented as the area between business-as-usual recovery and resilient recovery. For example, early warning systems, backup generators, mobile water purification, dynamic traffic control, and integrated communication networks can enable rapid response. A good capacity to respond means the recovery and continuity of essential services can also be kick-started faster.
- The capacity to recover is the speed at which infrastructure assets are fully restored, and their services are reinstated to the pre-disaster levels. In the graph, it is represented by the

slope of the recovery curve - a steeper slope indicates faster recovery and a stronger recovery capacity, while a gentler slope suggests a weaker capacity. Pre-arranged repair teams, modular infrastructure units, disaster funds, damage profiling tools, and smart rebuilding strategies can facilitate quick post-disaster infrastructure recovery. To further enhance the asset performance, recovery measures may include learnings from the experienced failures and strategies to "build back better," which in turn enhance the normal operating performance and increase the resilience dividend.

Infrastructure risk is higher in developed economies as most of the infrastructure is already built and will need measures such as retrofitting and enhanced maintenance to continue to be operable amidst changing risk scenarios — especially intensifying hazards due to climate change impacts. Hence, their projected disaster losses are higher, but their financial and technological capacities – capacities to respond and recover – are also higher to overcome these challenges. Developing and emerging economies are fighting on many fronts at once. The first challenge is to invest strategically in new infrastructure to boost economic growth, reduce infrastructure deficit, and address the underlying inequities of access. The second challenge is to institutionalise and mandate robust risk assessments and revise existing standards and codes for construction and maintenance to embed resilience within the entire infrastructure lifecycle. Developing and emerging economies, especially in Asia, Africa, and South America, are facing much more severe impacts of climate change; hence, the third challenge is to reduce disaster losses of existing assets and make financial resources available to meet such emerging contingent liabilities. These three challenges also create opportunities and advantages for early adoption of climate and disaster-resilient infrastructure. For EMDEs, any new infrastructure investment without strengthening resilience is akin to pouring water into a bamboo basket.

The next section explains the infrastructure risk landscape within developing and emerging economies vis-à-vis global risk. It dwells deeper into projected infrastructure losses, sectors, and

hazards of concern and quantifies disaster impact in terms of asset loss and GDP loss.

## INFRASTRUCTURE RISK LANDSCAPE IN DEVELOPING AND EMERGING ECONOMIES

There are multiple hazard risk assessment models and platforms available that may be referred to and leveraged for the purpose. UNDRR's Global Risk Model (GRM), a key component of the Global Assessment Report (GAR), provides data on hazards, exposure, and vulnerability. The Global Earthquake Model[2] , providing open-access risk modelling tools and vulnerability datasets on seismic hazards and risks. Although these models were not intended to explore infrastructure risk specifically in financial terms.

In 2023, the Coalition for Disaster Resilient Infrastructure (CDRI) launched the Global Infrastructure Risk Model and Resilience Index (GIRI) data platform.[3] which measures and analyses infrastructure risk and resilience across major sectors, including power, transport, telecommunications, water, education, and health systems worldwide. The platform provides detailed risk assessments for infrastructure assets exposed to climate-related hazards, supporting evidence-based decision-making for disaster risk reduction, climate adaptation, and resilient infrastructure development across countries and income levels. GIRI provides financial risk metrics in the form of global and country-level AAL–that is, the estimated contingent liabilities across critical infrastructure sectors due to disasters (Figure 2). GIRI can also be applied at regional, national, and subnational levels, leveraging better data and local knowledge. While regional risk assessments provide a deeper

2 Global Earthquake Model (GAM) is available at https://www.globalquakemodel.org/products

3 All the data presented in this section is available on the GIRI data platform, which is accessible at the link https://giri.unepgrid.ch/. GIRI is developed by a consortium of scientific and technical organisations, notably the CIMA Research Foundation (Italy), INGENIAR Risk Intelligence (Colombia), UNEP-GRID Geneva (Switzerland), and Norwegian Geotechnical Institute (Norway). The platform is open access.

understanding of geographic and sectoral variations, sub-national assessments can go a long way for pre-emptive planning and protecting assets (CDRI, 2025a).

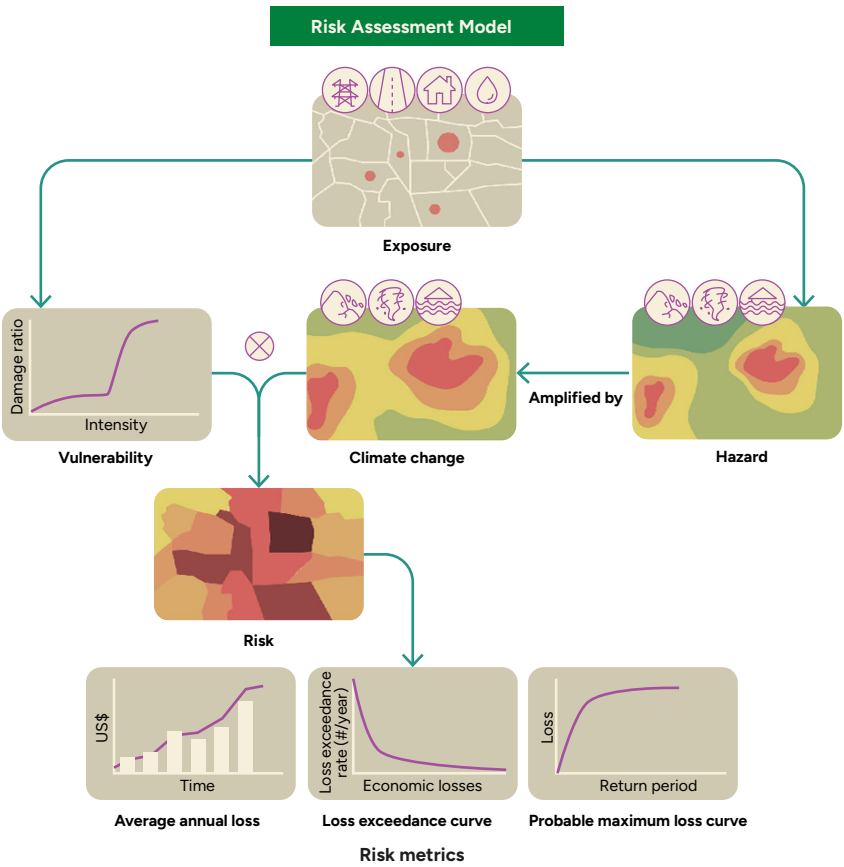



**Figure 2:** GIRI methodology. *Source: CDRI, 2025a.*

GIRI covers 6 hazards (Earthquake, Tsunami, Landslide, Flood, Tropical Cyclone, and Drought) and 9 infrastructure sectors (Power, Roads and Railways, Ports and Airports, Water and wastewater, Telecommunication, Oil and Gas, Education, Health, and Buildings). All data utilised in this section of the chapter are from the GIRI data platform, and the analysis is by the authors unless otherwise mentioned.

This section looks at the infrastructure and disaster risk in the top 50 developing and emerging economies of the world. To choose the countries, Gross Domestic Product (GDP) data (IMF, n.d.) for all the countries for the year 2023 was collected, and countries were selected based on their status as emerging and developing, as deemed by the International Monetary Fund (IMF). The list of countries and their respective GDPs is provided in Table 1. These countries together represent 34 per cent of the global GDP in the year 2023, amounting to $36.8 trillion.

| Sno. | Shortlisted Countries | GDP in billion US$ (2023) | Sno. | Shortlisted Countries | GDP in billion US$ (2023) |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | China | 18270.4 | 26 | Puerto Rico | 118.4 |
| 2 | India | 3638.5 | 27 | Angola | 112.5 |
| 3 | Brazil | 2191.1 | 28 | Kenya | 108.2 |
| 4 | Mexico | 1798.3 | 29 | Guatemala | 104.4 |
| 5 | Indonesia | 1371.2 | 30 | Uzbekistan | 102.6 |
| 6 | Türkiye | 1153.3 | 31 | Venezuela | 102.4 |
| 7 | Argentina | 648.9 | 32 | Costa Rica | 86.5 |
| 8 | Thailand | 515.9 | 33 | Croatia | 84.4 |
| 9 | Nigeria | 487.3 | 34 | Panama | 83.8 |
| 10 | Bangladesh | 451.5 | 35 | Sri Lanka | 83.7 |
| 11 | Philippines | 437.1 | 36 | Ghana | 80.5 |
| 12 | Vietnam | 433.0 | 37 | Côte d'Ivoire | 79.6 |
| 13 | Iran | 421.5 | 38 | Tanzania | 78.4 |
| 14 | Malaysia | 399.9 | 39 | Uruguay | 78.0 |
| 15 | Egypt | 393.8 | 40 | Azerbaijan | 72.4 |
| 16 | South Africa | 381.3 | 41 | Congo | 67.4 |
| 17 | Pakistan | 336.6 | 42 | Turkmenistan | 62.8 |
| 18 | Peru | 271.8 | 43 | Myanmar | 62.3 |
| 19 | Iraq | 270.8 | 44 | Uganda | 52.0 |
| 20 | Kazakhstan | 261.8 | 45 | Jordan | 51.2 |
| 21 | Algeria | 248.1 | 46 | Cameroon | 49.3 |
| 22 | Ethiopia | 159.8 | 47 | Tunisia | 48.5 |
| 23 | Morocco | 146.1 | 48 | Bahrain | 46.2 |
| 24 | Ecuador | 121.1 | 49 | Bolivia | 45.5 |
| 25 | Dominican Republic | 120.8 | 50 | Zimbabwe | 44.4 |

**Table 1:** Shortlisted Developing and Emerging Countries. *Source: (IM, n.d.).*

Taking climate change into account, the global AAL for infrastructure, including buildings, currently lies between $732–$845 billion, representing about 14 percent of 2021-2022 global GDP growth. Low- and middle-income economies LMICs hold roughly half of this contingent liability (CDRI,2023a). Table 2 depicts the composition of infrastructure risk globally in terms of major infrastructure sectors in comparison to EMDEs. Compared to the global AAL of $751.4 billion as per the existing climate scenario, the AAL for EMDEs is $308 billion. EMDEs represent 34 per cent of global GDP but 47 per cent of the global AAL, which represents a high amount of embedded infrastructure risk within these economies.

| Infrastructure Sectors | Global AAL % | EMDEs AAL% |
|---|---|---|
| Buildings | 55.8 | 69.0 |
| Education | 4.8 | 7.6 |
| Health | 0.1 | 0.1 |
| Oil and Gas | 0.9 | 0.7 |
| Ports and Airports | 2.0 | 1.1 |
| Power | 14.3 | 10.0 |
| Roads and Railways | 13.5 | 7.5 |
| Telecommunications | 7.3 | 3.3 |
| Water and Wastewater | 1.3 | 0.6 |
| **Grand Total** | **100.0** | **100.0** |

**Table 2:** AAL by Infrastructure Sector. *Source: Authors Analysis of GIRI Data (https://giri.unepgrid.ch/).*

EMDEs also have a higher risk embedded in the buildings sector, including education and health infrastructure, which represents 76 per cent of the total AAL. For critical infrastructure sectors, power and transport[4] represent 10 per cent ($31 billion) and 8.6 per cent ($ 23 billion) of the total AAL, which is quite substan-

4 Transport represents roads and railways, ports, and airports sectors

tial. Transport is a complex sector with many components and sub-components in terms of assets, networks, and stakeholders, which makes achieving resilience a collaborative task. Box 1 provides action points to drive the resilience of transport infrastructure.

**Box 1: Achieving Transport Sector Resilience**

The transport sector accounts for US$ 90 trillion and over 50 percent of the total exposed value of infrastructure globally and faces acute vulnerability to climate disruptions. In South Asia, the transport sector contributes to 4 to 8 per cent of the region's GDP, and transport assets worth approximately US$ 575 billion are exposed to climate hazards as of 2022. These risks include direct physical damage, as well as disruptions in transport networks. A failure in transport infrastructure can trigger cascading failures across interconnected economic systems. Such disruptions impact supply chains, manufacturing, and overall economic output. In the face of a changing climate, resilient transport systems are the foundation for economic stability and growth.

**CDRI and BCG (2024) recommend six calls to action to drive resilience of transport infrastructure:**

- Develop national & subnational resilience plans to align policy measures across sectors, including transport infrastructure, with measurable targets.
- Mainstream Climate Risk Assessments in the prefeasibility stage of greenfield and brownfield infrastructure projects to integrate climate risk evaluations into infrastructure planning.
- Establish comprehensive transport infrastructure codes and standards to ensure uniform application of climate-resilient measures across projects.
- Incorporate resilience in procurement for infrastructure projects.
- Embed resilience in skill development to create a workforce equipped to design and manage climate-resilient infrastructure through targeted modules.
- Enhance availability & access to finance to scale up the implementation of resilient projects in transport infrastructure through innovation in financing sources and instruments.

The third critical sector is telecommunications, which represents 3.3 per cent ($ 10 billion) of the total AAL in EMDEs. It is also one of the sectors that will experience considerably higher

investment due to the increasing importance of data in the age of digital economy and data transfer and processing infrastructure to continue with increasing impetus on Artificial Intelligence (AI) and Internet of Things (IoT). Although risk assessment for the telecommunication sector is still at a nascent stage, it is pertinent that resilience is embedded in the upcoming and existing telecommunications infrastructure. Box 2 provides details regarding the Disaster Risk and Resilience Assessment Framework (DRRAF) for the Telecom Sector.

**Box 2: Disaster Risk and Resilience Assessment Framework (DRRAF) for the Telecom Sector**

**CDRI, in partnership with India's Department of Telecommunications (DoT) and the National Disaster Management Authority (NDMA), has developed a Disaster Risk and Resilience Assessment Framework (DRRAF), specifically tailored to the telecommunication sector, along with an actionable roadmap for stakeholders at these levels. The project takes a system-scale approach, encompassing first, middle, and last-mile connectivity, interconnected infrastructure systems, and a variety of technological options across different geographical areas (mountains, plains, and coastal regions). The study proposes disaster resilience measures across five dimensions:** Technical Planning & Design, Operations & Maintenance, Policy, Institutions & Processes (PIPs), Financial Arrangements, and Expertise. The expansive framework is hence relevant for all EMDEs.

The Disaster Resilience Index serves as a vital matrix for guiding required changes in policy, infrastructure planning and design, operational procedures, maintenance strategies, capacity building, and financial investments. The index incorporates ten key indicators, including good governance, learning capacity, resourcefulness, flexibility, responsiveness, redundancy, robustness, information flows, safe failure, and interdependency *(CDRI, 2025d)*

In terms of hazards, Table 3 compares the global scenario with EMDEs. Flood, Earthquake, and Cyclone emerge as the three most important hazards representing up to 96 per cent of the total AAL. In EMDEs, flood risks are considerably higher. Flooding

in recent years has emerged as the most devastating hazard, causing billions of dollars in annual losses. Out of the 10 most disastrous flood events, 6 took place between 2010 and 2024, and the total disaster losses were to the tune of $ 281 billion in 2023 prices (AON,2024). Flood-related losses in EMDEs represent 66 per cent of the total AAL to the tune of $203 billion (Table 3).

| Hazards | Global AAL% | EMDEs AAL% |
|---|---|---|
| Cyclone | 14.9 | 10.6 |
| Earthquake | 26.7 | 19.9 |
| Flood | 51.7 | 66.0 |
| Landslide5 | 4.9 | 2.6 |
| Tsunami | 1.8 | 0.9 |
| **Grand Total** | **100.0** | **100.0** |

**Table 3: AAL by Hazard: Global and EMDEs.** *Source: Authors Analysis of GIRI Data (https://giri.unepgrid.ch/).*

Figure 3 shows the distribution of sectoral AAL by hazard, and it is clearly visible that flood indeed is the most devastating hazard within EMDEs, though its impact on various sectors is not the same. For example, in the ports and airports sector, more than 70 per cent of the AAL is due to cyclones, while up to 60 per cent of the water and wastewater AAL is due to earthquakes. For the power sector, earthquakes and cyclones are as devastating as floods, representing up to 50 per cent of the power sector AAL. It is therefore pertinent that sectoral approaches to mainstream resilience focus on hazards that are more relevant for a particular sector. 30 per cent of the power sector AAL amounting to $9.6 billion is due to cyclones. Box 3 provides certain recommendations and actions to build the resilience of the power sector against cyclones.

5 GIRI measures landslide risks for only the roads and railways sector. Hence, infrastructure loss due to landslides may be understated.

**Box 3: Enhancing Power Sector Resilience towards Extreme Weather Events**

A detailed research study by CDRI and GRIDCO (2024) in the state of Odisha in India recommends that stakeholders follow these steps to enhance the resilience of the power sector towards extreme weather events such as tropical cyclones.

- Update building codes and standards for transmission & distribution infrastructure.
- Update wind zonation maps and install anemometers at power substations.
- Track historic data for enhanced systemic resilience.
- Create data access platforms for physical climate risks.
- Incorporate the "resilience" component across policy frameworks, including non-structural measures.
- Develop a cross-sectoral framework for enhanced stakeholder collaboration, implement training programmes for effective disaster preparedness.
- Leverage innovative insurance mechanisms, balance force majeure clause implications, revisit contingent liability, and other contractual obligations.

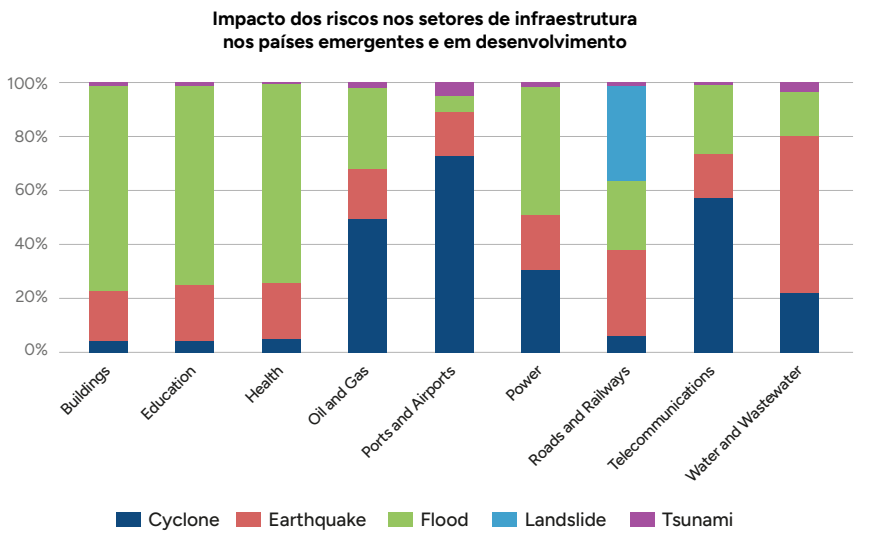



**Figure 3:** Impact of Hazards on Infrastructure Sectors in EMDEs.
*Source: Authors Analysis of GIRI Data (https://giri.unepgrid.ch/).*

Regionally within EMDEs, there are a lot of differences in how AAL is distributed. Africa represents 2.2 per cent, even with 16 countries in the list, which makes it clear that there is a huge infrastructure gap in African countries, which is also a timely opportunity to embed resilience, as most of the needed infrastructure is yet to be built. Asia, with its 20 countries, represents 83 per cent of the total AAL, with 77 per cent of GDP, which translates into a large contingent liability, a need for retrofitting existing infrastructure, and a need to invest in new infrastructure. It has two of the world's largest economies, India and China, which together represent 58 per cent of the total AAL and 59 per cent of the GDP within EMDEs. 9 countries from South America and the Caribbean represent 9 per cent of the AAL, with Brazil representing 60 per cent of the GDP and 47% of the AAL. Hence, enhancement in infrastructure resilience in India, China, and Brazil has the potential to benefit a large number of people and economic growth.

| Region | No. of Countries | AAL (Million $) | % AAL | GDP (2023, billion $) | % GDP |
|---|---|---|---|---|---|
| Africa | 16 | 6722 | 2.2 | 2537 | 6.9 |
| Asia | 20 | 256546 | 83.2 | 28443 | 77.2 |
| South America and the Caribbean | 9 | 28960 | 9.4 | 3666 | 10.0 |
| Others6 | 5 | 16159 | 5.2 | 2189 | 5.9 |
| **Grand Total** | **50** | **308387** | **100.0** | **36835** | **100.0** |

**Table 4:** Regional Landscape of Infrastructure Risk. *Source: Authors Analysis of GIRI Data (https://giri.unepgrid.ch/).*

Apart from Africa, which has lower AAL and higher relative AAL, Small Island Developing States (SIDS) also have fewer infrastructure assets and much greater vulnerability. SIDS are experiencing greater impacts of climate change, and their already existing

6 Others represent 5 countries, namely Croatia in Europe, Mexico in North America, and Guatemala, Panama, and Puerto Rico in Central America.

infrastructure assets and services are under greater threat. Box 4 presents the landscape of infrastructure risk in Africa and SIDS.

**Box 4: Infrastructure Resilience in Africa and Small Island Developing States (SIDS).**

CDRI (2025b, 2025c) provides special focus on countries in Africa and SIDS that do not have a very high AAL, but a higher Relative AAL. These working papers cover infrastructure risk analysis for all 55 countries in Africa and 55 SIDS countries and territories.

There are also inherent differences between the global level infrastructure risk by sectors in Africa and SIDS. For example, in SIDS, telecommunications bears the highest AAL at $589 million, followed closely by the power sector at $536 million. This vulnerability is exacerbated by reliance on single road networks, centralized power generation systems, and limited port infrastructure. Caribbean islands have higher AAL while Pacific Islands and AIMS (Africa, Indian Ocean, Mediterranean, and South China Sea) regions report considerably lower AALs but face greater relative risks due to limited fiscal capacity and high hazard exposure.

In Africa, smaller nations with fewer infrastructure assets bear significant losses to their economies when AAL is compared to their GDP. AAL represents 1.5 percent of Lesotho's GDP, 1.25 percent of Mauritius' GDP, and 1 percent of Comoros' GDP. Among the infrastructure sectors, the power sector has the largest AAL of $844 million, followed by telecommunications, amounting to $418 million, and roads and railways at $282 million. In Africa, the countries with the largest AAL for infrastructure and buildings are South Africa ($1.7 billion), Nigeria ($1.1 billion), and Algeria ($1 billion). These are large amounts for African governments to pay each year for the repair and reconstruction of damaged infrastructure. Africa cannot afford these losses.

AAL is a financial measure of probable asset loss and will always be lower for countries that do not have many infrastructure assets, although that doesn't mean that such countries have any less vulnerability. Countries with fewer assets may have a lot more exposure to hazards compared to countries with a higher number of assets. Hence, for such countries, Relative AAL is an important metric, which is the ratio of AAL and the exposed value of assets. Countries with fewer assets may have lower AAL and high relative AAL. Figure 4 shows AAL vis-à-vis Relative AAL in all the EMDEs.

Most countries in Africa do not have very high AALs but relatively high AALs comparable to those in South America. South American countries such as Ecuador and Bolivia may not have very high AALs, but their relative AALs are comparable to those of countries such as India and China.

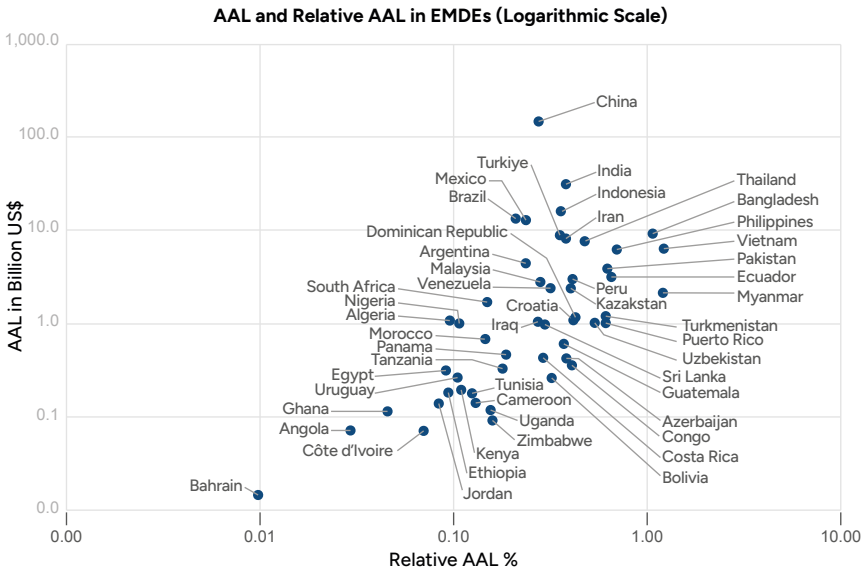



**Figure 4:** AAL and Relative AAL in EMDEs. *Source: Authors Analysis of GIRI Data (https://giri.unepgrid.ch/).*

It is therefore important that EMDEs resolve to enhance their capacities to absorb impacts of disasters through investing in new infrastructure, which is climate and disaster resilient, through institutionalising risk assessments and adopting new standards and codes. EMDEs with higher relative AAL will have to invest in retrofitting existing assets as well to reduce their contingent liabilities. High climate vulnerability combined with the need to invest in infrastructure and economic growth creates an opportunity for EMDEs to mainstream resilience.

The last section of this chapter presents a comprehensive list of key lessons and recommendations that will support EMDEs to be able to achieve disaster resilience of infrastructure and reap the resilience dividend.

## *REAPING RESILIENCE DIVIDEND: ACHIEVING DRI IN EMDES*

The following discussion outlines seven key lessons in practice for countries and governments to capture the resilience dividend by strengthening the resilience of infrastructure systems.

### A deeper understanding of risk is crucial.

Assessing infrastructure risks is the first step to enabling DRI action. Risk assessments can provide governments and infrastructure ministries with the required evidence base to obtain an overview of the risks across various sectors and inform policies and investment decisions at national and sub-national levels, as discussed in the last section in greater detail. Granular assessments at the local level can help infrastructure development agencies, utilities, asset operators, and DRM agencies plan maintenance and retrofits, build resilient new assets, and inform post-disaster reconstruction.

### Investing in resilient infrastructure can help minimise indirect macroeconomic costs.

Infrastructure failures and service disruptions due to disasters can impact trade and tourism, affect jobs and livelihoods, and incur reconstruction expenses at the cost of development. CDRI's macroeconomic analysis of eight diverse countries in different regions shows that indirect economic losses from infrastructure failures are, on average, 7.4 times higher than the direct costs of damaged assets and can be as high as 16 times in some countries (CDRI, 2025a). In fact, infrastructure failures can cause an average annual loss of about 5.2 percent of GDP growth between 2025 and 2050.

The analysis further shows that the speed of recovery and reconstruction directly influences the economic consequences of infrastructure failures due to disasters, with average GDP impact dropping from 7.4 percent under slow and partial reconstruction to 3% with full reconstruction over ten years, and could be lowered further to 2.3% if reconstruction is completed within four years (CDRI,

2025a). This analysis underscores that investing in resilient infrastructure development and rapid post-disaster reconstruction is, in fact, an important economic strategy for developing countries to restore productive capacity and limit the scale of compounding impacts.

### Building resilience of businesses requires a value chain perspective and deeper engagement.

Besides direct impacts on physical assets such as factories and buildings, cascading impacts of disasters can halt business operations and supply chains owing to damage to critical infrastructure systems and service failures. These disruptions can affect employment structures and profitability, with average annual profits potentially being reduced by as much as 15 percent (BCG, 2023).

CDRI's recent survey of over 500 companies from close to 60 countries indicates that while 82 percent of large firms report having continuity plans, only half of these plans have been tested, and around 60 percent still rely on ad-hoc responses. The survey also found that while insurance penetration is high among large businesses, more than 40 percent do not have sufficient coverage for disasters, and as many as 77 percent felt that government policies for resilience are either absent or poorly enforced (CDRI, 2025a).

These results underscore the growing vulnerability of businesses, inadequate resilience investments, and the need for strengthening capacities and government engagement. Moreover, end-to-end resilience of businesses requires a value chain perspective for reducing downtime and systemic vulnerabilities to minimise the cascading indirect impacts.

### Technologies offer transformative opportunities.

Technological innovations such as resilient 3D-printed homes, low-earth orbit satellites, and artificial intelligence are already being deployed for designing, constructing, and maintaining infrastructure assets widely. CDRI's review of 35+ new technologies and 100 case studies worldwide, conducted as part of the GIR 2025 report, shows that these tools will radically transform resilient infrastructure over the next decade (Stone, 2025).

Amongst a gamut of DRI-oriented applications, technologies can most prominently be leveraged for enhancing the data value chain, improving connectivity, communication, and collaboration, and strengthening infrastructure assets and network performance (Figure 5). For instance, Brazil's Civil Defence used an online dashboard to track and communicate disaster impacts in Rio Grande do Sul[7]. In India, an AI-powered system that tailors cyclone warnings to individual households, using data on dwelling type, location, and hazard exposure, was deployed ahead of Cyclone Yaas in 2021 (Ajmal, 2021)

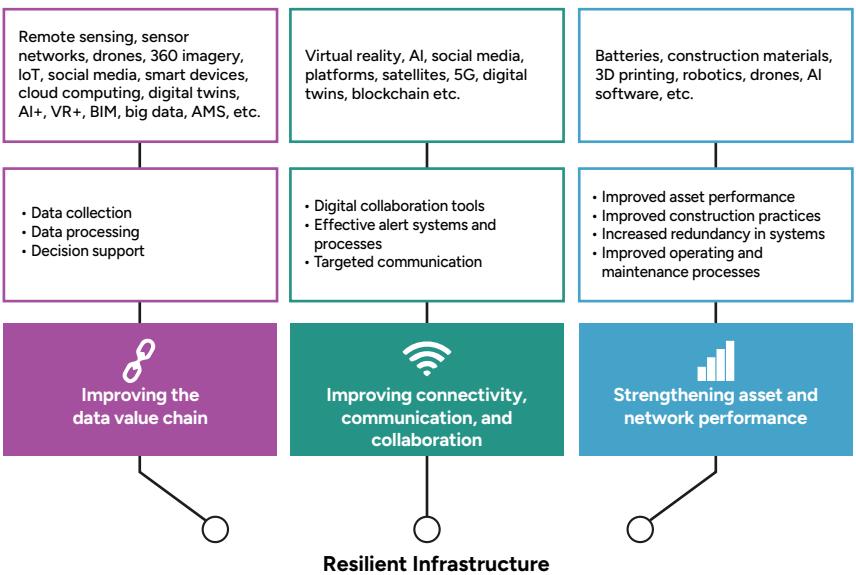



**Figure 5:** Technologies for Resilient Infrastructure. *Source: Stone, 2025.*

The cost of new Technologies is often a fraction of the cost of infrastructure service interruptions, considering they can reduce the costs of building and maintaining infrastructure assets; help increase the capacity to absorb shocks and thus avoid losses; and enable faster recovery and reconstruction after events occur. However, the benefits of new technologies for resilience can only

7 More information available at https://sosenchentes.rs.gov.br/inicial

be as effective as the technical skills of users and the institutional capacities of the implementing agencies and infrastructure operators to harness their full potential. Clear regulatory frameworks, standards, and incentives to act on technological outputs are also crucial. Moreover, building infrastructure resilience does not necessarily have to be high-tech. Simple, accessible solutions such as mobile apps for maintenance or communications with communities can be equally effective.

### Scaling innovative solutions such as NbS can deliver cost-effective resilience.

Nature-based solutions (NbS) for strengthening infrastructure resilience typically cost 50% less upfront than grey solutions and deliver 28% additional value (CDRI, 2025a).

In addition to shock absorption, NbS can also sustain critical functions during a disaster and facilitate quick recovery. For example, forests can serve as evacuation routes, wetlands can hold floodwaters, and green barriers can be used to mitigate heatwaves or floods. Further, NbS also offers long-term benefits, including cleaner air and recreational areas, as well as a robust local economy, which can be achieved at a lower cost compared to traditional grey infrastructure.

However, scaling up NbS from pilots to large-scale implementation typically requires combining grey, green, and blue solutions or "hybrid solutions" that integrate the predictability of engineered solutions with the adaptability and regenerative qualities of nature. A much-cited example is the Netherlands' Room for the River Programme that uses a complex system of hybrid solutions for flood resilience (European Climate-ADAPT, 2020).

Additionally, their implementation, maintenance, and rehabilitation require technical capacity and engagement across sectors and actors, including infrastructure agencies and local communities. Mainstreaming in master plans, sectoral strategies, procurement procedures, design manuals, tools, and concession agreements, besides well-designed financial instruments, can help align incentives for both public and private actors (CDRI, 2025a).

## Resilient infrastructure financing requires a layered approach.

Access to adequate financing is indispensable for implementing DRI strategies. At present, financing for DRI is largely reactive, deployed only after disasters cause widespread damage, leaving many countries, especially the developing economies, with persistent financing gaps. It is estimated that LMICs alone face an annual investment shortfall of around $3 trillion for adapting and retrofitting ageing infrastructure to be both net zero and resilient, to withstand climate impacts (CDRI, 2023a).

At the same time, infrastructure failures due to disasters not only have large economic impacts, but they also increase public debt burdens and lower a country's risk ratings. Therefore, it is critical to quantify direct and indirect resilience benefits through risk assessment and cost-benefit analysis tools – while making investment decisions for development of new infrastructure, maintenance and retrofitting of existing assets, and post-disaster reconstruction.

Moreover, resilient infrastructure financing requires a range of instruments available to absorb, respond to, and recover from the impacts of disasters, such as a combination of dedicated resilience budget lines, contingent budgets and loans, insurance, and fast access to international grants and soft credit (Figure 6). Concurrently, robust governance, clear resilience standards, and the incorporation of disaster risk considerations into public and private sector decisions – at national and sub-national levels - are necessary to ensure these investments realize their maximum effect.

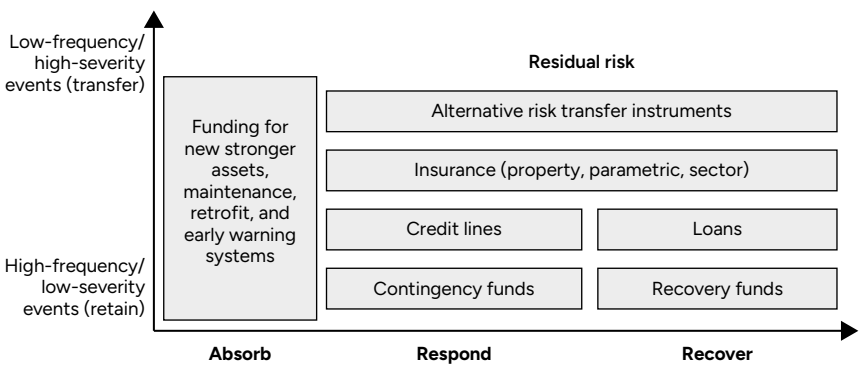



**Figure 6:** Landscape of infrastructure resilience financial instruments.

*Source: CDRI, 2025a.*

## Strengthening institutional capacities and governance is indispensable.

DRI is fundamentally a governance challenge and requires coordinated action across sectors, agencies, and levels of government. It is not the responsibility of infrastructure agencies alone; ministries of finance, planning bodies, land use authorities, subnational governments, legislators, and other service providers play a critical role, besides local communities and businesses, by embedding resilience into their own mandates and functions across the infrastructure resilience cycle.

Collaboration between infrastructure agencies and disaster authorities is also key. Integrated preparedness plans, drills, early warning systems, and rapid reconstruction of resilient infrastructure can only be effective when governance is clear and mandates are unambiguous. However, fragmented structures, overlapping responsibilities, and institutional and human capacity gaps remain key barriers to DRI action and effective response and recovery.

To better understand these gaps, CDRI conducted a Global Infrastructure Resilience Survey covering over 3,000 professionals in more than 100 countries as part of the GIR 2025 report. The findings reveal that many countries face shortages of trained staff, limited funding, and fragmented responsibilities. For instance, out of 3,000 professionals surveyed globally, nearly 40 percent of respondents report insufficient public sector capacity, with only 12%-15% reporting consistent use of new technologies and innovative solutions such as NbS. While private sector capacities are often stronger, only about one-third of respondents considered them sufficient. Besides, strengthening policies, standards, codes, and regulations emerged as the most critical action that governments can take to improve resilience (CDRI, 2025a).

Taking cognizance of some of these challenges, multiple initiatives have emerged in the recent past globally. Resilient Infrastructure has been a key area of policy focus as part of recent G20 and BRICS engagements, UNFCCC CoPs, and UNDRR Global and Regional Platforms. The OECD and the World Bank Group, with support from other multilateral development banks, have develo-

ped the Quality Infrastructure Investment (QII) Principles to guide countries and investors in ensuring that infrastructure investments are not only financially viable but also socially, environmentally, and economically sustainable.

CDRI, through its 60+ member countries and partners, has been making consistent efforts to further the DRI agenda, contributing and driving the global policy discourse and supporting governments in actioning the same through technical assistance and programmatic support. Capacity development through sharing of practical knowledge and resources - in the form of cutting-edge research, case studies, tools, and training - is a key focus area for CDRI towards helping governments, institutions, and stakeholders to develop, deliver, and scale infrastructure that is resilient to climate and disaster risks.

## REFERENCES


Ajmal, A. (2021, October 20). This non-profit is protecting vulnerable communities from the effects of climate change with AI. Source Asia. *This non-profit is protecting vulnerable communities from the effects of climate change with AI - Source Asia*

AON. (2024). *2024 Climate and Catastrophe Insight*. https://assets.aon.com/-/media/files/aon/reports/2024/climate-and-catastrophe-insights-report.pdf

Boston Consulting Group (BCG). (2023). *Coming to grips with corporate climate risk*. The Boston Consulting Group. https://web-assets.bcg.com/b4/78/8a615ed64cc496596f7c223cbc96/bcg-coming-to-grips-with-corporate-climate-risknov-2023-1.pdf

CDRI. (2023a). *Global Infrastructure Resilience: Capturing the Resilience Dividend- A Biennial Report from the Coalition for Disaster Resilient Infrastructure*. New Delhi. https://driconnect.cdri.world/resources/cdri-publications/biennial-report-on-global-infrastructure-resilience-capturing-the-resilience-dividend

CDRI (2023b). *DRI Lexicon – Shared understanding of terms that matter for Disaster Resilient Infrastructure*. Coalition for Disaster Resilient Infrastructure, New Delhi, India. https://doi.org/10.59375/cdri1001, https://lexicon.cdri.world/

CDRI and GRIDCO. (2024). *Policy Brief - Lessons from Odisha: Developing Power Sector Resilience to Extreme Weather Events in Coastal Areas*. https://driconnect.cdri.world/resources/cdri-publications/power-sector-policy-brief-odisha

CDRI and Prayas. (2025). *Navigating the Indian Power Sector in the Face of Extreme Heat*. https://driconnect.cdri.world/resources/cdri-publications/navigating-the-indian-power-sector-in-the-face-of-extreme-heat-a-scoping-note

CDRI and BCG. (2024). *Transport Infrastructure Reimagined: Forging Resilient Connections*. https://driconnect.cdri.world/resources/cdri-publications/transport-infrastructure-reimagined-forging-resilient-connections

CDRI. (2025a). *Global Infrastructure Resilience 2025: Capturing the Resilience Dividend*. New Delhi. https://driconnect.cdri.world/images/resources/MainReport_GIR_2025._709102968.pdf

CDRI. (2025b). *Infrastructure Resilience in Africa: GIR-2025 Working Paper*. New Delhi. https://driconnect.cdri.world/resources/cdri-publications/infrastructure-resilience-in-africa

CDRI. (2025c). *Infrastructure Resilience in Small Island Developing States: GIR-2025 Working Paper*. New Delhi. https://driconnect.cdri.world/resources/cdri-publications/gir-2025-sids

CDRI. (2025d). *Policy Brief: National and sub-national disaster risk & resilience assessment and roadmap for telecommunication sector, India*. New Delhi. https://driconnect.cdri.world/resources/cdri-publications/telecom-policy-brief

Centre for Research on the Epidemiology of Disasters (CRED). (2025). *2024 Disasters in Numbers*. CRED. https://files.emdat.be/reports/2024_EMDAT_report.pdf

European Climate-ADAPT. (2020). *Room for the River Waal – Protecting the city of Nijmegen*. https://climate-adapt.eea.europa.eu/en/metadata/case-studies/room-for-the-river-waal-2013-protecting-the-city-of-nijmegen

IMF. (n.d.). Real GDP growth. Retrieved February 1, 2025, from https://www.imf.org/external/datamapper/NGDPD@WEO/OEMDC/ADVEC/WEOWORLD

Hallegatte,S., Rentschler, J.; Rozenberg, J. (2019). *Lifelines: The Resilient Infrastructure Opportunity. Sustainable Infrastructure*, Washington, D.C.: World Bank. http://hdl.handle.net/10986/31805

McKinsey & Company. (2025). *The Infrastructure Moment: Investing in the Expanding Foundations of Modern Society*. https://www.mckinsey.com/~/media/mckinsey/industries/infrastructure/our%20insights/the%20infrastructure%20moment/the-infrastructure-moment-investing-in-the-expanding-foundations-of-modern-society.pdf

Stone, H. (2025). *GIR 2025 Working Paper on Technologies: Harnessing the Full Potential. Coalition for Disaster Resilient Infrastructure (CDRI)*. https://cdri.world/resilience-dividend/global-infrastructure-resilience-report-second-edition/

United Nations (UN). (2024). *The Sustainable Development Goals Report 2024*. https://unstats.un.org/sdgs/report/2024/

UNDRR. (2025). *Global Assessment Report on Disaster Risk Reduction 2025*. https://www.undrr.org/media/106862/download?startDownload=20260208

World Bank. (n.d.). Gross Fixed Capital Formation (Current US$) Retrieved February 1, 2025, from https://data.worldbank.org/indicator/NE.GDI.FTOT.CD?end=2024&start=1960&view=chart.

**Eletronic page:**

https://giri.unepgrid.ch/.

# CRÉDITOS

# CREDITS

# COLABORADORES E AUTORES


## ANA PAULA M. A. CUNHA

*ana.cunha@cemaden.gov.br*


Possui graduação em Física pela Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho (2004); mestrado em Meteorologia pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (2007) na área de micrometeorologia, com enfoque em calibração de modelo de superfície para área de caatinga; e doutorado em meteorologia pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (2013), com enfoque em impactos climáticos das mudanças dos usos e cobertura na região semiárida.

Atualmente, é Pesquisadora no Centro Nacional de Monitoramento e Alerta de Desastres Naturais (CEMADEN), onde, desde 2016, desenvolve pesquisas voltadas para o Monitoramento e Avaliação do Risco de desastres associados às secas em todo o Brasil. Desde 2015, é membro do Comitê Gestor do Programa Garantia-Safra do Ministério do Desenvolvimento Agrário e Agricultura Familiar (MDA) e contribui sistematicamente na verificação de perdas agrícolas em razão da seca. Desde 2019, é Docente no Programa de Pós-Graduação em Desastres (ICT/Unesp - Cemaden/MCTIC), onde ministra as disciplinas “Monitoramento e previsão de riscos de secas” e “Mudanças climáticas e desastres naturais”.


## ANDREA SOUZA SANTOS

*andrea.santos@pet.coppe.ufrj.br*


Atuou como coordenadora de Mudança do Clima e Sustentabilidade no Ministério do Meio Ambiente e Secretária Executiva do Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas, contratada pelo Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente.

Foi Autora Colaboradora do AR6 do Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) e Autora do Third Assessment Report (ARC3.3) da Urban Climate Change Research Network (UCCRN) da Columbia University

Atualmente, é Professora do Programa de Engenharia de Transportes da COPPE – UFRJ, pesquisadora e coordenadora do Laboratório de Transporte Sustentável (LabTS), onde atua nas linhas de pesquisa sobre tecnologia e sustentabilidade em transportes; cidades e mobilidade; mudança climática e transportes. É co-diretora do Hub da UCCRN para a América Latina e pesquisadora da Rede Clima/ MCTI.

## BEATRIZ KOPPERSCHMIDT DE OLIVEIRA

*bia.kopperschmidt@gmail.com*

Realizou intercâmbio acadêmico na Hafencity Universität, em Hamburgo, Alemanha, 2019-2020, com bolsa de Mérito Acadêmico.

Possui graduação em Arquitetura e Urbanismo pelo IAU-USP em 2022; mestrado na área de Teoria e História da arquitetura e urbanismo. Sua dissertação, "Infraestrutura Ferroviária no Interior Paulista: Sistemas de cidades, conflitos e permanências" (2024) (https://doi.org/10.11606/D.102.2024.tde-24012025-171307), está inserida na linha de pesquisa Habitação e infraestrutura na cidade e no território: produção e políticas públicas, no IAU-USP (Instituto de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo).

## BRUNO MARQUES DOS SANTOS SILVA

*bruno.marques@infrasa.gov.br*

Gestor público, ocupou o cargo de Coordenador Geral de Desapropriação e Reassentamento no DNIT e no Ministério dos Transportes, Portos e Aviação Civil. No Ministério, atuou também como Diretor de Planejamento e Gerente de Projeto da Subsecretaria de Sustentabilidade. Na Valec, exerceu a função de Chefe de Assessoria da Diretoria de Negócios e da Diretoria de Empreendimentos.

Possui graduação em Gestão Pública pela Faculdade Fortium e especialização em Direito Imobiliário pelo Centro Universitário Uniamérica.

Atualmente, é Superintendente de Gestão Ambiental e Territorial da Infra S.A.

## ÉRICO ROCHA

*erico.rocha@mma.gov.br*

Têm experiência nas áreas de financiamento climático, gestão de políticas públicas e macroeconomia verde, estando vinculado ao serviço público desde 2014. Trabalhou como coordenador de Desenvolvimento Internacional e Sustentabilidade na Secretaria de Assuntos Internacionais do Ministério da Fazenda, lidando diretamente com financiamento climático internacional e bancos multilaterais de desenvolvimento, além de ter atuado como Coordenador-Geral de Finanças e Conformidade no mesmo Ministério, atuando com formulação e gestão de políticas federais de financiamento às exportações, tanto em âmbito nacional quanto em foros e negociações internacionais.

Possui graduação em Economia e mestrado em Economia pela UFRJ; especialização em Gestão de Políticas Ambientais pela ENAP.

Atualmente, é Coordenador-Geral de Instrumentos de Implementação no Departamento de Políticas de Mitigação e Instrumentos de Implementação da Secretaria Nacional de Mudança do Clima do MMA e está trabalhando na coordenação da elaboração da Estratégia Transversal de Meios de Implementação do Plano Clima, no Ministério do Meio Ambiente e Mudança do Clima - Secretaria Nacional de Mudança do Clima.

## FELIPE FERNANDES QUEIROZ

*felipe.queiroz@antt.gov.br*

Possui graduação em Geografia pela Universidade de Brasília (UnB); mestrado em Economia na Escola de Economia e Finanças

da Fundação da Getúlio Vargas (EPGE/FGV); especialização em Gestão Pública pela Escola Brasileira de Administração Pública e de Empresas, da Fundação Getúlio Vargas (EBAPE/FGV).

Atualmente, é analista de infraestrutura do Ministério da Gestão e Inovação (MGI) e exerce o cargo de Diretor da Agência Nacional de Transportes Terrestres desde 2022.

## FERNANDO BARBELLI FEITOSA

*fernando.feitosa@antt.gov.br*

Possui doutorado em Direito pela Faculdade de Direito da Universidade de Brasília (FD/UnB); e mestrado em Regulação e Gestão de Negócios pelo Centro de Estudos em Regulação da UnB (Cerme/ Cief/UnB).

É especialista em Regulação da Agência Nacional de Transportes Terrestres (ANTT) desde 2005. Ocupa o cargo de Gerente de Regulação Ferroviária desde 2025.

## GABRIEL DALLA ROSA CARVALHO

*gabriel.carvalho.106@ufrn.edu.br*

Participou na elaboração de diversos estudos ambientais, monitoramento de programa de recuperação de áreas degradadas em linha de transmissão, programas de gerenciamento de resíduos sólidos, relatórios de avaliação de sistemas de tratamento de efluentes domésticos e industriais, dentre outros. Além disso, ministrou treinamentos para equipes na área de sustentabilidade, resíduos sólidos e tratamento de efluentes.

Possui graduação em Engenharia Ambiental e bacharelado em Ciências e Tecnologia pela Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN), além de formação técnica em Controle Ambiental pelo Instituto Federal do Rio Grande do Norte.

É mestrando no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental da UFRN, com ênfase na área de Geotecnologias e Ambientes Costeiros. Desenvolve pesquisas relacionadas a zonas

costeiras do Rio Grande do Norte, sobretudo na área de vulnerabilidade costeira a efeitos erosivos, balanço sedimentar e forçantes meteoceanográficas.

Atua no setor técnico da Ecoeng Consultoria Ambiental, no desenvolvimento de estudos, relatórios e monitoramentos ambientais.

## GEORGE YUN

*george.yun@transportes.gov.br*

Atuou na Superintendência Regional do DNIT/MG durante nove anos na área de desapropriação e reassentamento e ocupou os cargos de Coordenador e Coordenador-Geral, nas áreas de desapropriação, reassentamento, sustentabilidade e mudança do clima.

Possui mestrado em Engenharia Civil pelo Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – CEFET-MG; MBA em Gestão Pública com ênfase em projetos pela Fundação Getúlio Vargas – FGV; graduação em Arquitetura e Urbanismo; especialização em Avaliações e Perícias em Engenharia pelo IBAPE/PUCMINAS; especialização em Plantas Ornamentais e Paisagismo pela Universidade Federal de Lavras – UFLA; especialização em Gestão Master BIM junto à Universidade BIM – UniBIM/PISAC/PCTec/UnB.

Atualmente, é doutorando em Administração Pública no Instituto Brasileiro de Ensino, Desenvolvimento e Pesquisa (IDP) e atua como Analista de Infraestrutura do Ministério da Gestão e Inovação em Serviços Públicos com autorização de exercício no Ministério dos Transportes, desde 2008. Ocupa o cargo de Coordenador-Geral de Projetos Especiais e Mudança do Clima na Subsecretaria de Sustentabilidade-SUST, vinculada à Secretaria Executiva do Ministério dos Transportes.

## INAMARA MÉLO

*inamara.melo@mma.gov.br*

Exerceu o cargo de Secretária de Meio Ambiente e Sustentabilidade da cidade do Recife e do Estado de Pernambuco.

Possui mestrado em Gestão Ambiental pelo IFPE com estudos sobre adaptação aos impactos das mudanças climáticas e bacharelado em Comunicação Social.

Atualmente, é Diretora de Políticas para Adaptação e Resiliência na Secretaria Nacional de Mudança do Clima, no Ministério do Meio Ambiente e Mudança do Clima - Secretaria Nacional de Mudança do Clima, além de coordenar o Grupo de Trabalho de Adaptação do Comitê Interministerial de Mudança do Clima, que tem a tarefa de elaborar o Plano Clima Adaptação, documento que vai consolidar a agenda climática brasileira até 2035.

## JEANCARLO ALBERTO DOS REIS

*jeancarlo.reis@transportes.gov.br*

Possui especialização em Organização e Gestão de Eventos pela União Pioneira de Integração Social (UPIS) e graduação em Pedagogia pela Universidade de Brasília (UnB).

Atua no Ministério dos Transportes.

## JEFERSON TAVARES

*jctavares@usp.br*

Professor no Instituto de Arquitetura e Urbanismo (IAU-USP). Líder do Grupo de Pesquisa INFRA (Investigações em Infraestrutura: natureza, formas, redes e ambiente urbano) e coordenador nacional do Laboratório de Experiências Urbanísticas (LEU). Coordenador do projeto FAPESP "Transformações recentes no tecido urbano das cidades brasileiras. Perspectivas para formulação de políticas públicas em sistemas de cidades". Bolsista Produtividade CNPq (PQ-Nível 2) com o projeto "Infraestruturas nas Cidades Brasileiras: Perspectivas Urbanísticas para o Planejamento de Redes". Coordenador adjunto da Câmara Temática Mudanças Climáticas e Adaptabilidade do CAU/SP. Membro do INCT Klimapolis - Áreas urbanas brasileiras em perspectiva transdisciplinar: avaliação, cenários e soluções para adaptação às mudanças climáti-

cas e ao desenvolvimento sustentável e do "Klimapolis Laboratory" (*Max Planck Institut for Meteorology*). Membro da Câmara Temática Nacional de Adaptação e Infraestrutura Verde (Fórum Brasileiro de Mudança do Clima).

Experiências em planos urbano e regionais em regiões metropolitanas e para cidades de médio e pequeno portes. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2482-0380. Researcher ID da Web of Science: GZG-4636-2022. SCOPUS: 57214690653.

## JEFFERSON VASCONCELOS SANTOS

*jvasconceloss97@gmail.com*

Doutorando em Administração Pública pelo Instituto Brasileiro de Ensino, Desenvolvimento e Pesquisa (IDP), Mestre em Transportes pela Universidade de Brasília (UnB), MBA em Regulação pela AVM Faculdades Integradas, Especialista em Gestão de Empresas de Construção Civil pela Universidade Estadual do Ceará (UECE) e Engenheiro Civil pela Universidade Federal do Ceará (UFC). Analista de Infraestrutura do Ministério da Gestão e Inovação em Serviços Públicos em exercício no Ministério dos Transportes, desde 2008.

Ocupou cargos de assessoramento técnico e coordenação em atividades de gestão e acompanhamento de projetos voltados a obras, concessões, desestatizações e parcerias, em grande parte no setor ferroviário. Também atuou no conselho de administração da Companhia Docas do Pará e da Companhia Docas do Ceará. Atualmente ocupa o cargo de Diretor de Outorgas Ferroviárias na Secretaria Nacional de Transporte Ferroviário do Ministério dos Transportes.

## LEANDRO EUSTÁQUIO TITO MUNIZ

*leandro.muniz@dnit.gov.br*

Tem experiência profissional nas áreas de Geociências e Meio Ambiente.

Possui licenciatura em Geografia pela UFMG (2009); especialização em Avaliação de Impactos Ambientais pela Puc Minas (2013); mestrado em Economia e Meio Ambiente pela UnB (2017).

Desde outubro de 2013, é Analista em Infraestrutura de Transportes no DNIT e atua no licenciamento ambiental de empreendimentos de transportes. Desde setembro de 2020, atua como Chefe de Serviço de Desapropriação, Reassentamento e Meio Ambiente no DNIT em Minas Gerais.

## LIDIANE CRISTINA OLIVEIRA COSTA

*lidycristina@gmail.com*

Tem experiência na área de Geociências, com atuação nos temas de uso e cobertura da terra, impactos da seca na agricultura familiar por meio de índices de sensoriamento remoto e estudos do risco da seca na agricultura familiar.

Possui mestrado em Sensoriamento Remoto no Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE); graduação em Engenharia Ambiental pela Universidade do Vale do Paraíba (2011).

Atualmente, é doutoranda do curso de Desastres Naturais (UNESP/SP) e membro do Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais – CEMADEN.

## LUIZA CARVALHO TEREZA

*luizactereza@gmail.com*

Já atuou como trainee em sustentabilidade na Nestlé Nespresso na Suíça, com foco em pegada de carbono e análise de ciclo de vida, e como pesquisadora de economia circular na Escócia. Participou da coordenação de programas de saneamento e resíduos sólidos no Estado de Minas Gerais e do primeiro plano de drenagem urbana do Estado. Tem experiência em políticas públicas, planejamento estratégico e análise de dados.

Possui mestrado em Clima Urbano e Sustentabilidade pelo programa Erasmus Mundus da União Europeia; dupla graduação em Engenharia Civil pela Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais e Administração Pública pela Escola de Governo Paulo Neves de Carvalho.

É servidora efetiva do Estado de Minas Gerais, especialista em Políticas Públicas e Gestão Governamental, com dez anos de experiência no setor público. Atualmente, está à frente como Assessora-chefe de Sustentabilidade da Secretaria de Estado de Infraestrutura, Mobilidade e Parcerias de Minas Gerais, liderando estratégias ESG, mitigação e adaptação climática.

## MÁRCIA REGINA GUIMARÃES GUEDES

*mrgguedes@gmail.com*

Possui graduação em Física pela Universidade Federal de Itajubá (2006); mestrado em Física e Matemática Aplicada pela Universidade Federal de Itajubá (2009); doutorado em Astrofísica pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (2015), com ênfase em eventos solares extremos; pós-doutorado em Eventos Extremos pela Universidade de Santa Maria e Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais.

Desde 2017, atua como pesquisadora colaboradora no Cemaden, desenvolvendo pesquisas nas áreas de inundações, secas e eventos compostos de seca e calor.

## MARÍLIA GASPAR DE SOUZA LIMA

*marilia.gaspar@usp.br*

Atuou como Diretora de Planejamento, Obras e Serviços Municipais e Secretária de Infraestrutura e Planejamento Urbano da Prefeitura de Casa Branca-SP (2022-2024).

Possui graduação em Arquitetura e Urbanismo pela Universidade Federal de Viçosa (2014); mestrado em Arquitetura e Urbanismo pelo IAU/USP (2023), com a dissertação intitulada:

Rodovia e Cidade: a rodovia BR-262 em Minas Gerais e seus aspectos urbano-regionais, disponível em: https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/102/102132/tde-25072023-161202/pt-br.php.

Atualmente, é doutoranda em Arquitetura e Urbanismo pelo IAU/USP, participa do grupo INFRA (Investigações em Infraestrutura: natureza, formas, redes e ambiente urbano) e do Projeto FAPESP 2022/01583-9: Transformações recentes no tecido urbano das cidades brasileiras: perspectivas para formulação de políticas públicas em sistemas de cidades.

## NELSON P. A. MATEUS

*nelson.pa.mateus@gmail.com*

Possui doutorado em Análise e Modelagem de Sistemas Ambientais pela Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG); mestrado em Desastres Naturais pela Universidade Estadual Paulista (UNESP); e mestrado em Meteorologia pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE Capes 6).

Atualmente, atua como Meteorologista Desenvolvedor na empresa IACIT, onde desenvolve projetos na área de dados e Inteligência Artificial aplicada à meteorologia, com foco na criação de modelos preditivos baseados em aprendizado de máquina para previsão de variáveis meteorológicas (temperatura, precipitação), modelagem ambiental de uso e ocupação do solo, e criação de agentes inteligentes para automação e suporte à decisão em contextos meteorológicos e ambientais. Além disso, atua como Pesquisador colaborador no CEMADEN/MCTI.

## RODOLFO BENEVENUTO

*benevenr@tcd.ie*

Como subsecretário de inteligência econômica do Ministério da Economia, liderou a elaboração e disseminação de guias nacionais de análise socioeconômica, análise climática e estruturação de projetos de investimento em infraestrutura. Como diretor associado

de programas no *Global Infrastructure Hub*, coordenou pesquisas sobre infraestrutura resiliente para grupos de trabalho do G20 e para a Coalizão para Investimentos Resilientes ao Clima (CCRI).

Possui graduação em Engenharia Elétrica pela Universidade de São Paulo, MBA em Gestão de Projetos pela Fundação Getulio Vargas e PhD em Planejamento e Políticas de Transportes pelo Trinity College Dublin.

Sua pesquisa investiga o papel do planejamento da infraestrutura na erradicação da pobreza e no fortalecimento da resiliência climática.

Atualmente, é Especialista Regional de Efetividade do desenvolvimento do Banco Interamericano de Desenvolvimento, coordenador de Infratech e Sustentabilidade do PSP Hub, além de atuar como professor do MBA de PPPs da Fundação Escola de Sociologia Política de São Paulo e da certificação internacional de *Infrastructure Business Cases* da APMG.

## RICARDO LUIZ MEDEIROS MEIRELLES

*ricardo.meirelles@transportes.gov.br*

Possui graduação em Engenharia Civil pela Universidade Estadual Paulista (Unesp/Bauru) e mestrado em Engenharia dos Transportes pela Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo (EESC/USP).

É Analista de Infraestrutura do Ministério da Gestão e Inovação (MGI), em atividade na Subsecretaria de Sustentabilidade do Ministério dos Transportes (MT) desde 2021.

## SARAH DE ANDRADE E ANDRADE

*sarah.andrade@ufrn.br*

Foi professora do Curso de Arquitetura e Urbanismo do Centro Universitário FACEX (UNIFACEX, 2016-2019) e do curso de Arquitetura e Urbanismo da Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN) (2020-2022).

Possui graduação em Arquitetura e Urbanismo pela Universidade Federal do Rio Grande do Norte (2011), mestrado (2016) e doutorado (2024) pelo Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo desta mesma instituição (PPGAU-UFRN), estudando a relação entre planejamento urbano, práticas insurgentes e o Direito à Cidade.

Atualmente, é pesquisadora bolsista DTI do INCT KLIMAPOLIS, com foco na elaboração de Experimentos do Mundo Real - EMR, buscando desenvolver estratégias para implementação de uma governança climática participativa (academia-gestão-comunidades vulnerabilizadas), capaz construir novos paradigmas de adaptação para cidades costeiras do país. Também se insere como pesquisadora-extensionista colaboradora no LabHabitat/UFRN por meio do Projeto Fórum Direito à Cidade/UFRN (2018 - dias atuais), onde tem se dedicado à investigação e atuação nos campos do planejamento e projeto urbano e regional, participação popular e produção do espaço urbano, no contexto brasileiro. É, também, diretora do Salve Natal, coletivo multidisciplinar de luta pelo Direito à Cidade em Natal (RN).

## SUELEN ROBALLO FISCHER

*suelen.roballo@cemaden.gov.br*

Atuou nas áreas de Hidrologia, Mudanças Climáticas e desenvolvimento sustentável.

Possui graduação em Física Bacharelado pela Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), mestrado em Micrometeorologia, com ênfase no estudo do escoamento atmosférico utilizando túnel de vento, pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), doutorado em Meteorologia pelo INPE na área de climatologia, em que analisou-se a variabilidade atmosférica na América do Sul e vizinhanças utilizando uma ferramenta estatística conhecida como Padrão de Oscilação Principal (POP).

Atualmente, tecnologista na área de Meteorologia no Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais (CEMADEN/MCTI) em São José dos Campos/SP.

## THIAGO OLANTE CASAGRANDE

*thiago.casagrande@transportes.gov.br*

Possui 10 anos de experiência na gestão ambiental e sustentabilidade em aeroportos. Participou da coordenação do Grupo de Trabalho para elaboração do Plano Setorial de Mitigação do setor de Transportes e é ponto focal no Brasil para comunicação com a *Coalition for Disaster Resilient Infrastructure* - CDRI.

Possui graduação em Engenharia Ambiental pela Universidade do Vale do Itajaí, MBA em Gestão Ambiental e Desenvolvimento Sustentável e MBA em Construções Sustentáveis.

Atualmente, atua como Analista Superior na Coordenação Geral de Projetos Especiais e Mudança do Clima, Subsecretaria de Sustentabilidade do Ministério dos Transportes.

## THIAGO PIZZO SCATENA

*thiagopizzo@gmail.com*

Tem experiência profissional na área habitacional e urbana. Foi assessor parlamentar na Câmara Municipal de Ribeirão Preto (2021-2022), presta consultoria para gestores públicos e privados, além de assessorar movimentos sociais, notadamente de moradia. Foi conselheiro do meio ambiente (2015-2017), conselheiro de urbanismo (2021-2023) e é conselheiro de habitação (2019-presente). É associado fundador da OSC Instituto Território em Rede.

Possui graduação em Ciências Sociais pela UFSCar (2009) e mestrado em Arquitetura e Urbanismo pelo IAU/USP (2022).

É autor da dissertação "Aeroporto Leite Lopes de Ribeirão Preto: formação e conflitos em infraestrutura" (2022). Disponível em: <https://repositorio.usp.br/item/003106498>.

## VENERANDO EUSTÁQUIO AMARO

*venerando.amaro@ufrn.br*

Conduziu pesquisas sobre vulnerabilidade e dinâmica de ecossistemas costeiros, atua como Pesquisador Sênior no Instituto

Nacional de Ciência e Tecnologia KLIMAPOLIS, coordenou a Equipe de Geoprocessamento do Planejamento Espacial Marinho do Nordeste, coordena o Laboratório de Geotecnologias Aplicadas, Modelagens Costeira e Oceânica (GNOMO) da UFRN, orientou dezenas de mestres, doutores e pós-doutores, provê dados georreferenciados para resiliência costeira e gestão sustentável de recursos naturais.

Possui pós-doutorado em Engenharia Costeira (Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Portugal), doutorado em Geociências (Universidade de São Paulo/ Université de Lyon, França) e especialização em Geotecnologias Aplicadas (Sensoriamento Remoto, Sistemas de Informações Geográficas e Geodésia).

Publicou artigos em periódicos indexados, é autor de livros de referência, possui patente para monitoramento ambiental de contaminação por petróleo e habilidades em Geotecnologias Aplicadas para monitoramento de sistemas costeiros e marinhos.

É professor titular do Departamento de Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN).

# CONTRIBUTORS AND AUTHORS


## ANA PAULA M. A. CUNHA

*ana.cunha@cemaden.gov.br*


Holds a bachelor's degree in Physics from the Júlio de Mesquita Filho State University of São Paulo (2004); a master's degree in Meteorology from the National Institute for Space Research (2007) in the field of micrometeorology, with a focus on surface model calibration for the Caatinga region; and a PhD in Meteorology from the National Institute for Space Research (2013), with a focus on the climatic impacts of changes in land use and land cover in the semiarid region. Translated with DeepL.com (free version)

Currently, she is a researcher at the National Center for Natural Disaster Monitoring and Early Warning (CEMADEN), where, since 2016, she has been conducting research focused on the monitoring and assessment of disaster risks associated with droughts throughout Brazil. Since 2015, she has been a member of the Steering Committee for the Harvest Guarantee Program of the Ministry of Agrarian Development and Family Farming (MDA) and has consistently contributed to the assessment of agricultural losses caused by drought. Since 2019, she has been a professor in the Graduate Program in Disaster Studies (ICT/Unesp - Cemaden/MCTIC), where she teaches the courses "Monitoring and Forecasting Drought Risks" and "Climate Change and Natural Disasters."


## ANDREA SOUZA SANTOS

*andrea.santos@pet.coppe.ufrj.br*


She served as Coordinator for Climate Change and Sustainability at the Ministry of the Environment and as Executive Secretary of the Brazilian Panel on Climate Change, appointed by the United Nations Environment Programme.

She was a contributing author to AR6 of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) and an author of the Third Assessment Report (ARC3.3) of the Urban Climate Change Research Network (UCCRN) at Columbia University

Currently, she is a professor in the Transportation Engineering Program at COPPE–UFRJ, a researcher, and the coordinator of the Sustainable Transportation Laboratory (LabTS), where she conducts research on transportation technology and sustainability; cities and mobility; and climate change and transportation. She is co-director of the UCCRN Hub for Latin America and a researcher with Rede Clima/MCTI.

## *BEATRIZ KOPPERSCHMIDT DE OLIVEIRA*

*bia.kopperschmidt@gmail.com*

Underwent academic exchange at Hafencity University in Hamburg, Germany, from 2019 to 2020, with an Academic Merit Scholarship.

She holds a bachelor's degree in Architecture and Urban Planning from IAU-USP, earned in 2022, and a master's degree in the Theory and History of Architecture and Urban Planning. Her dissertation, "Rail Infrastructure in the Interior of São Paulo State: Urban Systems, Conflicts, and Persistence" (2024) (https://doi.org/10.11606/D.102.2024. tde-24012025-171307), is part of the research line Housing and Infrastructure in the City and Territory: Production and Public Policies at IAU-USP (Institute of Architecture and Urbanism at the University of São Paulo).

## *BRUNO MARQUES DOS SANTOS SILVA*

*bruno.marques@infrasa.gov.br*

A public administrator, he served as General Coordinator of Expropriation and Resettlement at the National Department of Transportation Infrastructure (DNIT) and the Ministry of Transportation, Ports, and Civil Aviation. At the Ministry, he

also served as Director of Planning and Project Manager for the Undersecretariat for Sustainability. At Valec, he served as Chief of Staff to the Business Division and the Projects Division.

He holds a bachelor's degree in Public Administration from Fortium College and a certificate in Real Estate Law from Uniamérica University Center.

Currently, he is the Superintendent of Environmental and Land Management at Infra S.A.

## *ÉRICO ROCHA*

*erico.rocha@mma.gov.br*

Has experience in the areas of climate finance, public policy management, and green macroeconomics, and has been a public servant since 2014. He served as Coordinator of International Development and Sustainability at the Office of International Affairs within the Ministry of Finance, working directly with international climate finance and multilateral development banks, and served as General Coordinator of Finance and Compliance at the same Ministry, working on the formulation and management of federal export financing policies, both domestically and in international forums and negotiations.

He holds a bachelor's degree in Economics and a master's degree in Economics from UFRJ; he also has a specialization in Environmental Policy Management from ENAP.

Currently, he serves as General Coordinator of Implementation Instruments in the Department of Mitigation Policies and Implementation Instruments at the National Secretariat for Climate Change within the Ministry of the Environment and Climate Change (MMA), and is coordinating the development of the Cross-Cutting Strategy for Implementation Instruments of the Climate Plan at the Ministry of the Environment and Climate Change—National Secretariat for Climate Change.

## FELIPE FERNANDES QUEIROZ

*felipe.queiroz@antt.gov.br*

Holds a bachelor's degree in Geography from the University of Brasília (UnB); a master's degree in Economics from the Getúlio Vargas Foundation School of Economics and Finance (EPGE/FGV); and a certificate in Public Management from the Getúlio Vargas Foundation Brazilian School of Public and Business Administration (EBAPE/FGV).

Currently, he is an infrastructure analyst at the Ministry of Management and Innovation (MGI) and has served as Director of the National Land Transport Agency since 2022.

## FERNANDO BARBELLI FEITOSA

*fernando.feitosa@antt.gov.br*

Holds a PhD in Law from the University of Brasília School of Law (FD/UnB); a master's degree in Business Regulation and Management from the University of Brasília Center for Regulatory Studies (Cerme/Cief/UnB); and a certificate in Regulation from the National Land Transport Agency (ANTT).

He has held the position of Railway Regulation Manager since 2025.

## GABRIEL DALLA ROSA CARVALHO

*gabriel.carvalho.106@ufrn.edu.br*

Has participated in the preparation of various environmental studies, the monitoring of a program for the restoration of degraded areas along transmission lines, solid waste management programs, and assessment reports on domestic and industrial wastewater treatment systems, among other projects. In addition, he conducted training sessions for teams in the areas of sustainability, solid waste, and wastewater treatment.

He holds a bachelor's degree in Environmental Engineering and a bachelor's degree in Science and Technology from the Federal University of Rio Grande do Norte (UFRN), as well as technical training in Environmental Control from the Federal Institute of Rio Grande do Norte.

He is a master's student in the Graduate Program in Civil and Environmental Engineering at UFRN, with a focus on geotechnologies and coastal environments. He conducts research on the coastal zones of Rio Grande do Norte, particularly in the areas of coastal vulnerability to erosion, sediment balance, and meteorological and oceanographic factors.

He works in the technical department at Ecoeng Environmental Consulting, where he develops environmental studies, reports, and monitoring programs.


## *GEORGE YUN*

*george.yun@transportes.gov.br*


Worked at the DNIT/MG Regional Superintendency for nine years in the area of land acquisition and resettlement, holding the positions of Coordinator and General Coordinator in the areas of land acquisition, resettlement, sustainability, and climate change.

He holds a master's degree in Civil Engineering from the Federal Center for Technological Education of Minas Gerais (CEFET-MG); an MBA in Public Management with a focus on projects from the Getúlio Vargas Foundation (FGV); a bachelor's degree in Architecture and Urban Planning; a specialization in Engineering Assessments and Expert Reports from IBAPE/PUCMINAS; a specialization in Ornamental Plants and Landscaping from the Federal University of Lavras (UFLA); and a specialization in Master BIM Management from BIM University (UniBIM/PISAC/PCTec/UnB).

Currently, he is a PhD student in Public Administration at the Brazilian Institute of Education, Development, and Research (IDP) and has served as an Infrastructure Analyst at the Ministry of Management and Innovation in Public Services, with authorization to work at the Ministry of Transportation, since 2008. He serves

as General Coordinator of Special Projects and Climate Change in the Undersecretariat for Sustainability (SUST), which is part of the Executive Secretariat of the Ministry of Transportation.

## *INAMARA MÉLO*

*inamara.melo@mma.gov.br*

Served as Secretary of the Environment and Sustainability for the city of Recife and the state of Pernambuco.

She holds a master's degree in Environmental Management from IFPE, with a focus on adaptation to the impacts of climate change, and a bachelor's degree in Mass Communication.

Currently, she serves as Director of Adaptation and Resilience Policies at the National Secretariat for Climate Change within the Ministry of the Environment and Climate Change - National Secretariat for Climate Change, in addition to coordinating the Adaptation Working Group of the Interministerial Committee on Climate Change, which is tasked with drafting the Climate Adaptation Plan, a document that will consolidate Brazil's climate agenda through 2035.

## *JEANCARLO ALBERTO DOS REIS*

*jeancarlo.reis@transportes.gov.br*

He holds a specialization in Event Planning and Management from the União Pioneira de Integração Social (UPIS) and a bachelor's degree in Education from the University of Brasília (UnB).

He works at the Ministry of Transportation.

## *JEFERSON TAVARES*

*jctavares@usp.br*

Professor at the Institute of Architecture and Urbanism (IAU-USP). Head of the INFRA Research Group (Infrastructure

Research: Nature, Forms, Networks, and the Urban Environment) and national coordinator of the Laboratory of Urban Experiments (LEU). Coordinator of the FAPESP project "Recent transformations in the urban fabric of Brazilian cities. Perspectives on Public Policy Making in Urban Systems" CNPq Productivity Fellowship (PQ-Level 2) for the project "Infrastructure in Brazilian Cities: Urban Perspectives for Network Planning." Deputy Coordinator of the Climate Change and Adaptation Committee of CAU/SP. Member of the INCT Klimapolis – Brazilian Urban Areas from a Transdisciplinary Perspective: Assessment, Scenarios, and Solutions for Adaptation to Climate Change and Sustainable Development, and of the "Klimapolis Laboratory" (*Max Planck Institute for Meteorology*). Member of the National Thematic Chamber on Adaptation and Green Infrastructure (Brazilian Forum on Climate Change).

Experience in urban and regional planning for metropolitan areas and small- and medium-sized cities. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2482-0380. Web of Science Researcher ID: GZG-4636-2022. SCOPUS: 57214690653.

## *JEFFERSON VASCONCELOS SANTOS*

*jvasconceloss97@gmail.com*

PhD student in Public Administration at the Brazilian Institute of Education, Development, and Research (IDP); Master's degree in Transportation from the University of Brasília (UnB); MBA in Regulation from AVM Faculdades Integradas; Specialist in Construction Management from the State University of Ceará (UECE); and Civil Engineer from the Federal University of Ceará (UFC). Infrastructure Analyst at the Ministry of Management and Innovation in Public Services, currently on assignment at the Ministry of Transportation since 2008.

He has held technical advisory and coordination positions in the management and oversight of projects related to construction, concessions, privatizations, and public-private partnerships,

primarily in the railway sector. He also served on the board of directors of Companhia Docas do Pará and Companhia Docas do Ceará. Currently holds the position of chief of staff at the National Secretariat of Rail Transport within the Ministry of Transportation.

## *LEANDRO EUSTÁQUIO TITO MUNIZ*

*leandro.muniz@dnit.gov.br*

He has professional experience in the fields of geosciences and the environment.

He holds a bachelor's degree in Geography from UFMG (2009); a certificate in Environmental Impact Assessment from PUC Minas (2013); and a master's degree in Economics and the Environment from UnB (2017).

Since October 2013, he has been a Transportation Infrastructure Analyst at DNIT and works on environmental permitting for transportation projects. Since September 2020, he has served as Head of the Expropriation, Resettlement, and Environment Division at the DNIT in Minas Gerais.

## *LIDIANE CRISTINA OLIVEIRA COSTA*

*lidycristina@gmail.com*

She has experience in the field of geosciences, specializing in land use and land cover, the impacts of drought on family farming using remote sensing indices, and studies on drought risk in family farming.

She holds a master's degree in Remote Sensing from the National Institute for Space Research (INPE) and a bachelor's degree in Environmental Engineering from the University of Vale do Paraíba (2011).

Currently, she is a PhD student in the Natural Disasters program (UNESP/SP) and a member of the National Center for Natural Disaster Monitoring and Alerts (CEMADEN).

## LUIZA CARVALHO TEREZA

*luizactereza@gmail.com*

She has worked as a sustainability trainee at Nestlé Nespresso in Switzerland, focusing on carbon footprints and life-cycle analysis, and as a circular economy researcher in Scotland. She participated in the coordination of sanitation and solid waste programs in the state of Minas Gerais and in the state's first urban drainage plan. She has experience in public policy, strategic planning, and data analysis.

She holds a master's degree in Urban Climate and Sustainability from the European Union's Erasmus Mundus program and dual bachelor's degrees in Civil Engineering from the Pontifical Catholic University of Minas Gerais and in Public Administration from the Paulo Neves de Carvalho School of Government.

She is a permanent civil servant for the State of Minas Gerais, specializing in public policy and government management, with ten years of experience in the public sector. Currently, she serves as Chief Sustainability Advisor at the Minas Gerais State Secretariat for Infrastructure, Mobility, and Partnerships, where she leads ESG strategies, climate mitigation, and adaptation efforts.

## MÁRCIA REGINA GUIMARÃES GUEDES

*mrgguedes@gmail.com*

Holds a bachelor's degree in Physics from the Federal University of Itajubá (2006); a master's degree in Physics and Applied Mathematics from the Federal University of Itajubá (2009); a PhD in Astrophysics from the National Institute for Space Research (2015), with a focus on extreme solar events; and a postdoctoral fellowship in Extreme Events from the University of Santa Maria and the National Center for Natural Disaster Monitoring and Alerts.

Since 2017, she has served as a research associate at Cemaden, conducting research in the areas of floods, droughts, and combined drought and heat events.

## MARÍLIA GASPAR DE SOUZA LIMA

*marilia.gaspar@usp.br*

She served as Director of Planning, Public Works, and Municipal Services and as Secretary of Infrastructure and Urban Planning for the City of Casa Branca, São Paulo (2022–2024).

She holds a bachelor's degree in Architecture and Urban Planning from the Federal University of Viçosa (2014); a master's degree in Architecture and Urban Planning from IAU/USP (2023), with a thesis titled: Highway and City: the BR-262 highway in Minas Gerais and its urban-regional aspects, available at: https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/102/102132/tde-25072023-161202/pt-br.php.

Currently, she is a PhD student in Architecture and Urban Planning at IAU/USP, and is a member of the PExURB group—Research, Teaching, and Extension Practices in Urban Planning—and of the FAPESP Project 2022/01583-9: Recent transformations in the urban fabric of Brazilian cities: perspectives for the formulation of public policies in urban systems.

## NELSON P. A. MATEUS

*nelson.pa.mateus@gmail.com*

Holds a PhD in Analysis and Modeling of Environmental Systems from the Federal University of Minas Gerais (UFMG); a master's degree in Natural Disasters from the São Paulo State University (UNESP); and a master's degree in Meteorology from the National Institute for Space Research (INPE Capes 6).

Currently, he works as a Meteorologist and Developer at IACIT, where he develops projects in the field of data and artificial intelligence applied to meteorology, focusing on the creation of machine learning-based predictive models for forecasting meteorological variables (temperature, precipitation), environmental modeling of land use and land cover, and the creation of intelligent agents for automation and decision support in meteorological and

environmental contexts. In addition, he serves as a research associate at CEMADEN/MCTI.

## *RODOLFO BENEVENUTO*

*benevenr@tcd.ie*

As Deputy Secretary for Economic Intelligence at the Ministry of Economy, he led the development and dissemination of national guidelines on socioeconomic analysis, climate analysis, and the structuring of infrastructure investment projects. As an associate program director at the Global Infrastructure Hub, he coordinated research on resilient infrastructure for G20 working groups and the Coalition for Climate-Resilient Investment (CCRI).

He holds a bachelor's degree in Electrical Engineering from the University of São Paulo, an MBA in Project Management from the Getulio Vargas Foundation, and a PhD in Transport Planning and Policy from Trinity College Dublin.

His research examines the role of infrastructure planning in poverty eradication and in strengthening climate resilience.

Currently, he serves as a Regional Development Effectiveness Specialist at the Inter-American Development Bank, Coordinator of Infrastructure Technology and Sustainability at the PSP Hub, and teaches in the PPP MBA program at the São Paulo School of Political Sociology Foundation and the APMG International Infrastructure Business Cases certification program.

## *RICARDO LUIZ MEDEIROS MEIRELLES*

*ricardo.meirelles@transportes.gov.br*

Holds a bachelor's degree in Civil Engineering from the State University of São Paulo (Unesp/Bauru) and a master's degree in Transportation Engineering from the São Carlos School of Engineering at the University of São Paulo (EESC).

He is an Infrastructure Analyst at the Ministry of Management and Innovation (MGI) and has been working in the Undersecretariat for Sustainability at the Ministry of Transportation (MT) since 2021.

## SARAH DE ANDRADE E ANDRADE

*sarah.andrade@ufrn.br*

Was a professor in the Architecture and Urban Planning program at FACEX University Center (UNIFACEX, 2016–2019) and in the Architecture and Urban Planning program at UFRN (2020–2022).

She holds a bachelor's degree in Architecture and Urban Planning from the Federal University of Rio Grande do Norte (2011), a master's degree (2016), and a PhD (2019–2024) from the Graduate Program in Architecture and Urbanism at the same institution (PPGAU-UFRN), studying the relationship between urban planning, insurgent practices, and the Right to the City.

She is currently a DTI fellow at INCT KLIMAPOLIS, focusing on the development of Real-World Experiments (RWE) to devise strategies for implementing participatory climate governance (involving academia, government, and vulnerable communities) capable of establishing new adaptation paradigms for the country's coastal cities. She is also a collaborating researcher and extension specialist at LabHabitat/UFRN through the Right to the City Forum/UFRN Project (2018–present), where she has been engaged in research and practice in the fields of urban and regional planning and design, public participation, and the shaping of urban space within the Brazilian context. She is also the director of Salve Natal, a multidisciplinary collective advocating for the Right to the City in Natal (RN).

## SUELEN ROBALLO FISCHER

*suelen.roballo@cemaden.gov.br*

Worked in the areas of hydrology, climate change, and sustainable development.

She holds a Bachelor's degree in Physics from the Federal University of Santa Maria (UFSM) and a Master's degree in Micrometeorology, with a focus on the study of atmospheric flow using wind tunnels, from the National Institute for Space Research (INPE), and a PhD in Meteorology from INPE in the field of climatology, in which he analyzed atmospheric variability in South America and neighboring regions using a statistical tool known as the Principal Oscillation Pattern (POP).

Currently, she is a meteorological technician at the National Center for Natural Disaster Monitoring and Alerts (CEMADEN/MCTI) in São José dos Campos, São Paulo.

## *THIAGO OLANTE CASAGRANDE*

*thiago.casagrande@transportes.gov.br*

Has 10 years of experience in environmental management and sustainability at airports. He helped coordinate the Working Group responsible for drafting the Sectoral Mitigation Plan for the transportation sector and serves as the focal point in Brazil for communication with the Coalition for Disaster Resilient Infrastructure (CDRI).

He holds a bachelor's degree in Environmental Engineering from the University of Vale do Itajaí, an MBA in Environmental Management and Sustainable Development, and an MBA in Sustainable Construction.

Currently, he serves as a Senior Analyst in the General Coordination Office for Special Projects and Climate Change, within the Undersecretariat for Sustainability at the Ministry of Transportation.

## *THIAGO PIZZO SCATENA*

*thiagopizzo@gmail.com*

Has professional experience in the housing and urban development sector. He served as a legislative aide at the Ribeirão Preto City Council (2021–2022), provides consulting services to public

and private sector managers, and advises social movements, particularly those focused on housing. He served as councilor for the environment (2015–2017) and councilor for urban planning (2021–2023), and has served as councilor for housing (2019–present). He is a founding member of the NGO Instituto Território em Rede.

He holds a bachelor's degree in Social Sciences from UFSCar (2009) and a master's degree in Architecture and Urban Planning from IAU/USP (2022).

He is the author of the dissertation "Leite Lopes Airport in Ribeirão Preto: Development and Conflicts in Infrastructure" (2022). Available at: <https://repositorio.usp.br/item/003106498>.

## *VENERANDO EUSTÁQUIO AMARO*

*venerando.amaro@ufrn.br*

Conducted research on the vulnerability and dynamics of coastal ecosystems, serves as a Senior Researcher at the KLIMAPOLIS National Institute of Science and Technology, coordinated the Geoprocessing Team for Marine Spatial Planning in the Northeast, and coordinates the Laboratory of Applied Geotechnologies, Coastal and Oceanic Modeling (GNOMO) at UFRN, has advised dozens of master's, doctoral, and postdoctoral students, and provides georeferenced data for coastal resilience and sustainable natural resource management.

He holds a postdoctoral degree in Coastal Engineering (National Laboratory of Civil Engineering, Portugal), a PhD in Geosciences (University of São Paulo/Université de Lyon, France), and a specialization in Applied Geotechnologies (Remote Sensing, Geographic Information Systems, and Geodesy).

He has published articles in indexed journals, is the author of reference books, holds a patent for environmental monitoring of oil contamination, and possesses expertise in applied geotechnologies for monitoring coastal and marine systems.

He is a full professor in the Department of Civil and Environmental Engineering at the Federal University of Rio Grande do Norte (UFRN).

# ÍNDICE REMISSIVO


## A

**Adaptação** - 26, 76, 78, 86, 87, 88, 89, 90, 92, 95, 97, 99, 101, 103, 142, 144, 187, 191, 518, 536, 699, 700

**Aeroporto** - 19, 28, 81, 365, 414, 415, 416, 417, 418, 419, 420, 421, 422, 423, 424, 425, 426, 427, 428, 430, 435, 441, 509, 512, 706

## C

**Cidade** - 28, 41, 91, 133, 136, 228, 237, 299, 304, 306, 310, 318, 319, 320, 321, 349, 356, 357, 360, 363, 364, 365, 366, 375, 378, 379, 382, 395, 408, 414, 415, 416, 417, 418, 419, 423, 425, 426, 427, 428, 452, 454, 457, 459, 460, 463, 464, 465, 466, 467, 468, 469, 470, 471, 472, 473, 474, 475, 477, 580, 584, 624, 695, 698, 703, 705

**Climáticos** - 6, 7, 10, 14, 18, 19, 20, 21, 27, 28, 29, 31, 32, 33, 34, 36, 39, 43, 44, 76, 77, 78, 80, 81, 82, 83, 84, 86, 91, 92, 93, 94, 95, 96, 97, 98, 127, 131, 133, 135, 137, 140, 142, 143, 144, 145, 146, 147, 180, 181, 182, 185, 186, 187, 188, 189, 191, 194, 195, 196, 197, 198, 233, 258, 263, 268, 269, 270, 272, 299, 361, 367, 380, 509, 514, 517, 518, 520, 524, 525, 527, 528, 530, 532, 534, 566, 585, 614, 615, 616, 618, 626, 628, 630, 652, 653, 658, 663, 666, 676, 678, 694

**Conflitos** - 18, 19, 20, 27, 28, 49, 354, 355, 359, 361, 362, 363, 364, 365, 368, 371, 373, 374, 375, 376, 377, 414, 415, 418, 419, 421, 422, 425, 426, 427, 428, 429, 430, 452, 453, 460, 517, 575, 695, 706

## D

**Desafios** - 6, 7, 10, 14, 20, 21, 26, 31, 83, 89, 95, 97, 126, 127, 129, 135, 140, 142, 189, 224, 296, 314, 319, 355, 362, 363, 366, 369, 370, 374, 376, 377, 383, 517, 518, 524, 525, 533, 561, 572, 617, 626, 627, 629, 652, 658, 678

**Desastres** - 15, 20, 28, 36, 42, 76, 77, 78, 83, 84, 87, 99, 132, 133, 148, 174, 231, 240, 259, 260, 279, 299, 512, 518, 520, 523, 532, 549, 614, 615, 619, 624, 627, 629, 652, 653, 654, 655, 656, 657, 658, 659, 660, 664, 665, 666, 671, 672, 673, 676, 677, 678, 694, 701, 702, 703, 705

## F

**Ferroviária** - 19, 27, 93, 181, 186, 354, 355, 358, 359, 360, 363, 367, 370,

372, 373, 376, 377, 380, 385, 417, 420, 510, 566, 567, 572, 576, 580, 583, 585, 618, 627, 695, 697

**Ferrovias** - 78, 80, 180, 189, 191, 192, 193, 196, 197, 198, 237, 263, 354, 355, 356, 358, 359, 361, 362, 370, 372, 374, 375, 379, 380, 381, 382, 410, 510, 514, 518, 519, 527, 529, 530, 535, 559, 563, 566, 572, 575, 579, 581, 584, 618, 619, 620, 622, 628, 660, 662, 665, 669

## G

**Global** - 8, 14, 16, 20, 24, 29, 50, 71, 80, 86, 98, 99, 100, 102, 105, 111, 117, 123, 124, 129, 132, 135, 137, 138, 140, 147, 148, 150, 154, 156, 158, 161, 163, 164, 165, 166, 173, 176, 181, 185, 203, 207, 273, 274, 275, 282, 291, 293, 294, 297, 298, 300, 317, 321, 322, 323, 325, 326, 328, 346, 349, 350, 351, 372, 373, 387, 402, 403, 407, 473, 500, 509, 514, 515, 534, 538, 543, 544, 555, 562, 567, 568, 576, 582, 587, 591, 592, 597, 600, 606, 611, 630, 648, 653, 655, 658, 659, 662, 665, 666, 667, 668, 669, 671, 672, 674, 675, 677, 678, 679, 680, 681, 688, 689, 690, 691, 704, 718

## I

**Impactos** - 6, 14, 15, 18, 19, 20, 21, 27, 28, 31, 32, 33, 34, 36, 37, 38, 39, 41, 44, 47, 49, 76, 77, 80, 81, 83, 84, 85, 87, 92, 93, 96, 126, 128, 129, 132, 133, 134, 135, 136, 137, 138, 139, 143, 146, 180, 182, 183, 185, 186, 187, 189, 193, 194, 196, 199, 221, 224, 228, 237, 258, 259, 260, 261, 263, 264, 265, 266, 267, 270, 271, 272, 273, 276, 283, 284, 292, 298, 299, 300, 301, 303, 313, 314, 317, 352, 354, 356, 359, 360, 361, 362, 363, 366, 368, 371, 376, 377, 380, 382, 414, 415, 418, 419, 420, 425, 426, 427, 428, 452, 464, 474, 475, 508, 509, 513, 514, 515, 516, 518, 520, 522, 524, 525, 529, 532, 533, 534, 562, 572, 574, 615, 616, 630, 653, 654, 655, 656, 657, 658, 668, 671, 672, 673, 674, 675, 676, 694, 699, 701

**Infraestruturas** - 1, 2, 3, 6, 10, 11, 14, 18, 19, 20, 21, 26, 27, 31, 32, 33, 34, 36, 37, 38, 39, 40, 41, 42, 43, 44, 45, 46, 47, 48, 49, 76, 77, 78, 79, 80, 82, 83, 87, 89, 95, 96, 97, 98, 133, 136, 137, 180, 181, 182, 185, 187, 188, 192, 194, 195, 197, 198, 239, 258, 261, 262, 270, 272, 296, 300, 303, 309, 311, 312, 318, 355, 356, 357, 361, 362, 363, 364, 365, 367, 370, 372, 375, 376, 377, 378, 379, 417, 425, 508, 509, 510, 512, 514, 515, 516, 517, 518, 519, 520, 522, 524, 525, 526, 527, 529, 530, 532, 569, 575, 580, 614, 615, 616, 618, 619, 622, 624, 625, 626, 627, 628, 629, 630, 652, 654, 658, 659, 662, 663, 664, 667, 668, 669, 671, 672, 673, 674, 675, 676, 677, 678, 699

**Investimentos** - 26, 35, 37, 38, 46, 49, 76, 77, 79, 126, 127, 128, 129, 130, 132, 133, 136, 137, 138, 139, 140, 141, 142, 143, 144, 145, 146, 188, 189, 190, 193, 194, 195, 198, 200, 269, 272, 300, 362, 371, 373, 376, 377, 378, 381, 382, 415, 427, 455, 465, 473, 518, 519, 522, 525, 526, 527, 528, 571, 572, 579, 580, 581, 629, 630, 653, 664, 673, 678, 704

## M

**Mudanças** - 6, 10, 14, 18, 19, 28, 31, 32, 35, 42, 43, 44, 45, 46, 47, 77, 78, 83, 88, 95, 97, 126, 127, 128, 131, 132, 133, 138, 141, 142, 143, 144, 145, 180, 185, 188, 191, 193, 194, 195, 196, 224, 226, 227, 231, 234, 237, 239, 240, 260, 262, 270, 271, 272, 297, 298, 299, 300, 301, 303, 315, 354, 356, 360, 362, 363, 367, 368, 370, 372, 375, 376, 377, 383, 422, 452, 473, 475, 508, 509, 510, 514, 516, 518, 519, 520, 524, 525, 526, 527, 530, 531, 533, 535, 536, 567, 580, 614, 615, 617, 622, 624, 626, 654, 655, 657, 658, 662, 663, 664, 668, 671, 694, 699, 705

## P

**Planejamento** - 1, 3, 10, 18, 19, 20, 31, 32, 44, 45, 47, 48, 49, 52, 73, 76, 80, 83, 89, 92, 93, 96, 97, 129, 137, 144, 145, 229, 231, 232, 239, 265, 272, 284, 299, 315, 318, 319, 354, 355, 356, 358, 359, 360, 362, 363, 370, 371, 372, 373, 374, 375, 376, 377, 378, 379, 380, 425, 426, 427, 428, 452, 453, 457, 458, 460, 475, 477, 509, 516, 517, 518, 523, 567, 572, 585, 586, 625, 626, 627, 629, 655, 659, 663, 664, 677, 695, 699, 702, 704, 705, 707

**Plano Clima** - 15, 17, 18, 22, 26, 76, 78, 86, 87, 97, 99, 524, 530, 531, 696, 699

**Projetos** - 4, 6, 10, 21, 96, 97, 98, 126, 129, 130, 139, 140, 141, 142, 143, 144, 145, 146, 147, 150, 176, 188, 189, 193, 194, 195, 197, 198, 199, 200, 225, 315, 371, 372, 374, 375, 415, 426, 476, 503, 517, 527, 528, 529, 530, 573, 580, 581, 582, 583, 584, 585, 617, 620, 622, 625, 626, 629, 663, 675, 698, 700, 703, 704, 706

## R

**Reassentamento** - 27, 191, 224, 225, 226, 227, 228, 229, 230, 231, 232, 233, 234, 236, 238, 239, 695, 698, 701

**Resiliência** - 1, 3, 6, 10, 14, 15, 18, 19, 20, 26, 28, 29, 32, 37, 38, 39, 40, 41, 42, 43, 45, 46, 47, 49, 76, 77, 78, 80, 82, 91, 92, 93, 95, 96, 97, 98, 126, 127, 129, 130, 131, 132, 133, 134, 135, 136, 137, 138, 140, 141, 142, 143, 144, 145, 146, 180, 181, 182, 183, 185, 188, 189, 190, 191, 192, 193, 194, 195, 197, 198, 224, 231, 239, 240, 262, 272, 296, 314, 317, 318, 414, 415, 427, 428, 474, 475, 506, 508, 509, 515, 517, 521, 522, 524, 525, 526, 528, 529,

530, 535, 614, 616, 617, 619, 624, 625, 626, 627, 628, 630, 652, 654, 655, 656, 657, 658, 659, 663, 664, 666, 667, 668, 669, 671, 672, 673, 674, 675, 676, 677, 678, 699, 707

**Riscos** - 6, 10, 14, 18, 19, 20, 27, 29, 31, 32, 33, 34, 36, 39, 40, 41, 42, 43, 44, 48, 49, 76, 77, 78, 80, 81, 82, 83, 87, 88, 89, 90, 91, 92, 93, 94, 95, 96, 97, 98, 126, 127, 129, 130, 131, 132, 134, 137, 139, 140, 142, 143, 144, 145, 147, 148, 173, 178, 180, 182, 185, 186, 187, 188, 189, 191, 194, 198, 226, 231, 233, 236, 237, 262, 264, 268, 269, 272, 296, 299, 300, 310, 317, 318, 359, 361, 363, 364, 367, 368, 375, 380, 464, 508, 511, 513, 514, 515, 517, 519, 520, 523, 525, 528, 530, 532, 534, 584, 614, 618, 619, 622, 626, 627, 628, 630, 652, 653, 654, 655, 657, 658, 659, 660, 663, 664, 665, 666, 667, 668, 669, 671, 672, 674, 676, 678, 679, 694

S

**SbN** - 15, 20, 89, 314, 318, 614, 615, 617, 618, 619, 620, 622, 623, 625, 626, 627, 628, 629, 630, 675, 678

**Sustentabilidade** - 4, 6, 10, 14, 15, 18, 19, 21, 28, 42, 89, 97, 132, 143, 144, 180, 187, 188, 189, 191, 192, 193, 196, 197, 198, 208, 209, 213, 240, 257, 314, 318, 355, 374, 381, 509, 520, 522, 523, 524, 531, 534, 560, 563, 566, 567, 571, 572, 576, 585, 614, 625, 629, 694, 695, 696, 697, 698, 701, 702, 704, 706

T

**Transporte** - 6, 7, 10, 14, 15, 18, 19, 20, 34, 36, 78, 79, 80, 81, 89, 91, 92, 93, 99, 128, 135, 137, 186, 187, 191, 200, 234, 239, 258, 259, 261, 262, 263, 267, 268, 269, 270, 271, 272, 273, 298, 354, 355, 357, 359, 361, 370, 371, 381, 453, 457, 460, 462, 463, 470, 473, 474, 475, 508, 509, 510, 511, 512, 513, 514, 515, 516, 517, 519, 520, 521, 530, 532, 533, 535, 536, 560, 563, 565, 566, 567, 569, 570, 571, 572, 573, 574, 575, 576, 577, 578, 579, 580, 582, 587, 614, 615, 616, 617, 619, 622, 624, 625, 627, 628, 630, 653, 659, 662, 663, 695, 700

V

**Vulnerabilidades** - 18, 20, 31, 33, 34, 40, 43, 45, 47, 49, 80, 83, 88, 131, 133, 135, 137, 146, 309, 428, 508, 509, 515, 518, 624, 629, 673

As opiniões, hipóteses e conclusões ou recomendações expressas neste material são de responsabilidade do(s) autor(es) e não necessariamente refletem a visão da FAPESP.

# INDEX

## A

**Adaptation** - 8, 12, 16, 17, 26, 52, 59, 63, 64, 67, 69, 73, 100, 101, 102, 103, 105, 107, 111, 112, 113, 114, 115, 117, 120, 121, 122, 123, 124, 138, 147, 148, 149, 150, 151, 153, 155, 156, 157, 158, 159, 164, 165, 166, 167, 168, 169, 170, 171, 172, 173, 174, 175, 176, 207, 209, 210, 212, 213, 215, 216, 217, 218, 220, 241, 248, 277, 288, 291, 321, 323, 326, 327, 331, 342, 349, 351, 406, 410, 501, 530, 533, 534, 536, 537, 546, 547, 548, 549, 550, 552, 553, 554, 555, 556, 557, 559, 560, 561, 562, 564, 565, 632, 637, 640, 645, 669, 672, 713, 714, 716, 719

**Airport** - 23, 28, 106, 281, 395, 433, 434, 435, 436, 437, 438, 439, 440, 441, 442, 443, 444, 445, 446, 447, 449, 538, 541, 721

## C

**Challenges** - 8, 9, 12, 16, 24, 25, 26, 50, 53, 71, 108, 114, 120, 121, 122, 149, 153, 154, 156, 161, 163, 166, 168, 175, 211, 241, 324, 342, 347, 391, 392, 393, 396, 399, 400, 404, 405, 406, 413, 546, 553, 561, 564, 595, 596, 635, 644, 647, 666, 671, 688

**Changes** - 56, 65, 67, 108, 113, 115, 120, 159, 160, 169, 203, 244, 247, 255, 273, 292, 344, 349, 386, 390, 397, 401, 403, 406, 407, 413, 433, 434, 441, 445, 446, 447, 448, 554, 565, 604, 634, 641, 677, 708

**City** - 28, 67, 105, 116, 160, 162, 163, 204, 245, 254, 320, 322, 326, 327, 332, 334, 338, 346, 348, 349, 350, 386, 387, 390, 393, 394, 395, 396, 401, 405, 408, 409, 411, 412, 413, 433, 434, 435, 436, 437, 438, 441, 444, 445, 446, 447, 448, 479, 481, 484, 486, 487, 490, 491, 492, 493, 494, 495, 497, 498, 500, 501, 504, 505, 669, 680, 691, 709, 713, 717, 719, 720

**Climate** - 1, 3, 4, 8, 9, 12, 16, 17, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 50, 51, 52, 53, 56, 57, 61, 64, 65, 66, 68, 71, 72, 73, 75, 100, 101, 102, 103, 105, 106, 107, 108, 110, 111, 112, 113, 114, 115, 116, 117, 118, 119, 120, 121, 122, 123, 124, 125, 131, 138, 147, 148, 149, 150, 151, 153, 154, 155, 156, 157, 158, 159, 160, 161, 162, 163, 164, 165, 166, 167, 168, 169, 170, 171, 172, 173, 174, 175, 176, 179, 202, 203, 204, 206, 207, 208, 209, 210, 211, 212, 213, 214, 215, 216, 217, 218, 219, 220, 241, 243, 244, 247, 248, 250, 251, 254, 255, 256, 273, 274, 275, 276, 277, 278, 279, 280, 281, 282, 286, 287, 288, 289, 290, 291, 292, 293, 294, 295, 321, 323, 324, 325, 326, 327, 328, 329, 331, 332, 339,

343, 345, 346, 347, 348, 349, 351, 384, 386, 391, 392, 393, 398, 402, 405, 406, 411, 479, 500, 502, 530, 531, 533, 534, 535, 536, 537, 538, 539, 540, 543, 545, 546, 547, 548, 549, 550, 551, 552, 553, 554, 555, 556, 557, 558, 559, 560, 561, 562, 563, 564, 565, 576, 581, 586, 587, 590, 591, 599, 600, 602, 604, 605, 606, 607, 608, 609, 610, 611, 632, 633, 635, 636, 642, 643, 644, 645, 646, 647, 648, 666, 667, 668, 669, 671, 672, 673, 675, 676, 679, 680, 682, 686, 687, 689, 691, 695, 708, 709, 710, 712, 713, 714, 716, 718, 719, 720

**Climate Plan** - 17, 26, 101, 103, 111, 112, 122, 553, 559, 710

D

**Disasters** - 16, 28, 58, 63, 64, 66, 101, 102, 103, 109, 123, 124, 158, 159, 160, 174, 209, 248, 253, 256, 278, 279, 326, 533, 540, 549, 560, 562, 631, 632, 633, 635, 637, 642, 643, 644, 646, 647, 648, 667, 668, 669, 670, 672, 680, 682, 683, 684, 687, 690, 708, 715, 717

G

**Global** - 8, 14, 16, 20, 24, 29, 50, 71, 80, 86, 98, 99, 100, 102, 105, 111, 117, 123, 124, 129, 132, 135, 137, 138, 140, 147, 148, 150, 154, 156, 158, 161, 163, 164, 165, 166, 173, 176, 181, 185, 203, 207, 273, 274, 275, 282, 291, 293, 294, 297, 298, 300, 317, 321, 322, 323, 325, 326, 328, 346, 349, 350, 351, 372, 373, 387, 402, 403, 407, 473, 500, 509, 514, 515, 534, 538, 543, 544, 555, 562, 567, 568, 576, 582, 587, 591, 592, 597, 600, 606, 611, 630, 648, 653, 655, 658, 659, 662, 665, 666, 667, 668, 669, 671, 672, 674, 675, 677, 678, 679, 680, 681, 688, 689, 690, 691, 704, 718

I

**Impacts** - 8, 16, 17, 22, 23, 24, 27, 28, 50, 53, 54, 55, 56, 58, 59, 60, 61, 62, 65, 66, 68, 70, 71, 100, 101, 102, 105, 106, 108, 109, 110, 112, 117, 118, 121, 122, 124, 133, 134, 146, 153, 155, 156, 159, 160, 161, 163, 164, 165, 169, 171, 202, 204, 207, 208, 209, 211, 215, 216, 218, 221, 241, 245, 254, 275, 277, 278, 279, 280, 282, 283, 285, 286, 289, 290, 291, 294, 295, 325, 326, 327, 328, 329, 331, 341, 342, 345, 353, 384, 386, 389, 390, 391, 392, 393, 396, 398, 401, 406, 407, 410, 412, 433, 434, 437, 438, 439, 444, 445, 446, 447, 479, 491, 498, 500, 501, 502, 530, 534, 537, 538, 541, 543, 544, 545, 547, 549, 551, 553, 554, 558, 559, 560, 561, 562, 563, 588, 596, 598, 604, 612, 633, 634, 647, 667, 668, 669, 670, 671, 680, 682, 684, 685, 687, 708, 713, 715

**Infrastructure** - 1, 3, 8, 12, 13, 16, 17, 20, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 35, 43, 50, 51, 52, 53, 54, 55, 56, 57, 58, 59, 60, 61, 62, 63, 64, 65, 66, 67, 68, 69, 70, 71, 72, 73, 75, 99, 100, 101, 102, 103, 104, 105, 106, 107, 108, 111, 112, 114, 115, 117, 118, 120, 121, 122, 123, 124, 125, 147, 148, 149, 150, 151, 153, 154, 155, 156, 157, 158, 159, 160, 161, 162, 163, 164, 165, 167, 168, 169, 170, 171, 172, 173, 174, 175, 176, 179, 202, 203, 204, 207, 208, 209, 210, 211, 213, 214, 215, 216, 217, 218, 219, 220, 221, 222, 241, 242, 245, 248, 255, 256, 277, 280, 281, 282, 284, 285, 286, 287, 288, 289, 324, 328, 331, 333, 334, 337, 338, 339, 340, 341, 343, 344, 345, 346, 353, 384, 385, 386, 387, 388, 390, 391, 392, 393, 394, 397, 399, 400, 401, 402, 405, 406, 407, 408, 410, 412, 413, 433, 434, 436, 438, 439, 441, 444, 445, 446, 447, 449, 478, 479, 480, 483, 484, 487, 489, 492, 498, 499, 500, 501, 504, 505, 507, 530, 538, 539, 540, 541, 543, 544, 545, 546, 547, 548, 549, 550, 551, 553, 554, 555, 556, 557, 558, 559, 561, 563, 564, 588, 589, 591, 593, 597, 599, 603, 604, 606, 607, 609, 610, 612, 613, 631, 632, 633, 634, 635, 636, 637, 638, 640, 642, 643, 644, 645, 646, 647, 648, 649, 653, 654, 659, 666, 667, 668, 669, 670, 671, 672, 673, 674, 675, 676, 677, 678, 679, 680, 681, 682, 683, 684, 685, 686, 687, 688, 689, 690, 691, 704, 706, 709, 711, 712, 713, 714, 716, 717, 718, 719, 720, 721

**Investments** - 23, 26, 59, 67, 70, 101, 102, 104, 153, 154, 155, 156, 157, 158, 159, 163, 164, 165, 166, 167, 168, 170, 171, 172, 210, 211, 212, 214, 215, 216, 217, 218, 220, 288, 291, 328, 392, 401, 403, 406, 407, 408, 411, 412, 434, 482, 492, 500, 547, 548, 551, 554, 555, 556, 557, 595, 597, 603, 605, 646, 647, 667, 684, 687, 689

## N

**NbS** - 17, 24, 114, 342, 346, 632, 633, 635, 636, 637, 638, 640, 641, 643, 644, 645, 646, 647, 648, 686, 688

## P

**Planning** - 1, 3, 8, 12, 17, 22, 24, 53, 54, 66, 68, 69, 70, 101, 105, 108, 114, 116, 117, 120, 122, 150, 156, 168, 170, 176, 246, 248, 256, 284, 291, 324, 327, 346, 347, 348, 382, 384, 386, 389, 390, 392, 393, 400, 401, 402, 403, 404, 405, 406, 407, 408, 409, 410, 412, 439, 444, 445, 446, 447, 448, 479, 480, 484, 485, 487, 502, 504, 538, 545, 546, 547, 552, 591, 596, 599, 608, 610, 632, 635, 642, 643, 644, 645, 647, 648, 668, 673, 676, 677, 688, 709, 710, 712, 713, 714, 717, 718, 719, 721

**Projects** - 4, 8, 12, 25, 66, 113, 120, 121, 122, 149, 156, 165, 166, 167, 168, 169, 170, 171, 172, 173, 175, 176, 210, 211, 215, 216, 217, 219, 221, 222, 242, 257, 325, 384, 401, 402, 404, 405, 434, 436, 441, 443, 444, 445, 479, 480, 533, 545, 546, 548, 555, 556, 557, 558, 561, 590, 597, 604, 605, 606, 607, 608, 609, 610, 640, 643, 644, 646, 676, 710, 711, 713, 714, 715, 717, 718, 720

## R

**Rail** - 106, 117, 208, 209, 358, 373, 388, 397, 403, 603, 709, 715

**Railway** - 23, 27, 28, 203, 209, 218, 281, 372, 384, 385, 387, 388, 389, 390, 391, 392, 393, 396, 397, 400, 402, 403, 404, 405, 407, 409, 410, 411, 413, 436, 449, 540, 590, 591, 594, 599, 600, 601, 603, 605, 606, 607, 608, 609, 646, 711, 715

**Resettlement** - 23, 27, 213, 241, 242, 243, 244, 245, 246, 247, 248, 250, 251, 254, 255, 256, 709, 712, 715

**Resilience** - 1, 3, 8, 12, 16, 17, 22, 23, 24, 26, 28, 29, 50, 51, 53, 54, 58, 59, 61, 62, 63, 64, 66, 67, 68, 71, 72, 99, 100, 101, 102, 103, 105, 107, 115, 116, 118, 120, 121, 122, 124, 147, 148, 149, 150, 153, 155, 156, 157, 159, 160, 161, 162, 163, 164, 166, 167, 168, 169, 170, 171, 172, 174, 175, 202, 203, 204, 207, 210, 211, 212, 213, 214, 215, 216, 217, 219, 220, 241, 248, 256, 281, 291, 324, 342, 345, 346, 433, 434, 446, 447, 501, 502, 507, 526, 537, 538, 544, 546, 548, 550, 551, 552, 554, 555, 556, 557, 558, 563, 631, 632, 634, 635, 637, 642, 643, 645, 647, 649, 653, 659, 664, 666, 667, 668, 669, 670, 671, 672, 676, 677, 678, 679, 680, 681, 682, 683, 684, 685, 686, 687, 688, 689, 690, 691, 713, 718, 721

**Risks** - 8, 12, 16, 22, 23, 24, 27, 29, 52, 53, 54, 55, 56, 61, 62, 64, 65, 69, 70, 73, 100, 101, 102, 103, 105, 106, 107, 108, 113, 114, 115, 116, 117, 118, 120, 121, 122, 125, 150, 153, 154, 156, 157, 158, 161, 163, 165, 166, 168, 169, 170, 171, 173, 176, 179, 202, 203, 204, 206, 207, 208, 209, 210, 211, 213, 216, 219, 220, 243, 250, 253, 254, 281, 283, 287, 288, 291, 293, 324, 327, 328, 338, 345, 346, 389, 391, 393, 394, 395, 397, 398, 405, 410, 491, 501, 533, 537, 542, 543, 544, 546, 548, 552, 554, 562, 563, 607, 608, 632, 636, 637, 640, 643, 644, 645, 646, 647, 666, 667, 669, 672, 676, 677, 678, 679, 681, 683, 689, 708

## S

**Sustainability** - 4, 8, 12, 16, 17, 22, 23, 25, 28, 63, 64, 114, 121, 158, 169, 170, 202, 210, 211, 213, 214, 215, 218, 219, 220, 342, 346, 385, 404, 411, 530,

533, 537, 538, 549, 552, 559, 561, 590, 591, 595, 596, 599, 600, 609, 631, 632, 643, 646, 649, 708, 710, 711, 712, 713, 716, 718, 719, 720

T

**Transportation** - 8, 9, 12, 16, 17, 22, 23, 55, 56, 58, 103, 104, 108, 112, 114, 116, 117, 154, 161, 163, 164, 203, 207, 220, 251, 275, 280, 281, 282, 289, 290, 291, 292, 294, 389, 390, 391, 401, 438, 445, 480, 484, 500, 502, 535, 536, 538, 539, 540, 541, 543, 544, 545, 546, 548, 549, 550, 552, 553, 554, 555, 556, 558, 559, 560, 563, 564, 573, 585, 587, 588, 589, 593, 594, 595, 596, 597, 598, 600, 601, 602, 603, 604, 609, 611, 612, 632, 633, 635, 637, 640, 642, 643, 644, 646, 647, 709, 712, 713, 714, 715, 718, 719, 720

V

**Vulnerabilities** - 22, 24, 53, 55, 56, 61, 64, 66, 68, 70, 101, 105, 108, 121, 158, 159, 161, 163, 171, 216, 337, 343, 389, 447, 537, 538, 544, 547, 684

The opinions, hypotheses, conclusions, and recommendations expressed in this material are the sole responsibility of the author(s) and do not necessarily reflect the views of FAPESP.

ISBN: 978-65-990484-5-6

MINISTÉRIO DOS TRANSPORTES

GOVERNO DO BRASIL
DO LADO DO POVO BRASILEIRO