

Explorando Metodologias de Análise de Risco Climático para a Infraestrutura de Transporte

Exploring Climate Risk Analysis Methodologies for Transportation Infrastructure

Victor Hugo Souza de Abreu, Doutor em Engenharia de Transportes, Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa em Engenharia.

victor@pet.coppe.ufrj.br

Sandra Oda, Professora em Engenharia de Transportes, Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa em Engenharia.

sandraoda@poli.ufrj.br

Andrea Souza Santos, Professora em Engenharia de Transportes, Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa em Engenharia.

andrea.santos@pet.coppe.ufrj.br

Resumo

A mudança climática apresenta diversos desafios para o setor de transporte devido à sua alta vulnerabilidade às condições climáticas e meteorológicas, assim como aos impactos decorrentes de eventos climáticos extremos. Esses eventos têm influência direta na vida útil da infraestrutura e na segurança do transporte. Isso ressalta a necessidade de incorporar considerações sobre mudança climática em projetos regulares de infraestrutura de transporte, destacando a importância de realizar uma Análise de Risco Climático (ARC) abrangente. Este estudo tem como objetivo examinar diversas metodologias fundamentais de ARC no setor de transportes, enfatizando suas vantagens proeminentes e identificando desafios significativos. Além disso, destaca-se a importância de uma abordagem integrada, evidenciando a convergência dessas metodologias. Isso proporciona uma visão abrangente dos elementos essenciais a serem considerados em uma ARC, ressaltando a necessidade de uma abordagem holística para lidar com os impactos da mudança climática no setor de transporte.

Palavras-chave: Mudança Climática; Infraestrutura Rodoviária; Análise de Risco Climático.

Abstract

Climate change poses several challenges for the transportation sector due to its high vulnerability to climate and weather conditions, as well as the impacts of extreme weather events. These events have a direct influence on the useful life of infrastructure and transportation safety. This underscores the need to incorporate climate change considerations into regular transportation infrastructure projects, highlighting the importance of conducting a comprehensive Climate Risk Analysis (CRA). This study aims to examine several key CRA methodologies in the transport sector, emphasizing their prominent advantages and identifying significant challenges. In addition, it highlights the importance of an integrated approach, highlighting the convergence of these methodologies. This provides a comprehensive overview of the essential elements to be considered in a CRA, highlighting the need for a holistic approach to dealing with the impacts of climate change in the transport sector.

Keywords: *Climate Change; Road Infrastructure; Climate Risk Analysis.*

1. Introdução

Os sistemas de transporte e sua infraestrutura foram em grande parte projetados e operados para condições climáticas históricas, com alguma margem de segurança, que agora são frequentemente ultrapassadas em virtude de eventos extremos fora da faixa "típica" acarretados pela mudança climática [1,2]. A vida útil projetada de uma ponte pode variar de 50 a 100 anos, enquanto a de uma rodovia pode variar de 20 a 30 anos, portanto é imperativo considerar eventos climáticos futuros e como esses eventos afetarão os investimentos e a capacidade de manutenção dos componentes da infraestrutura [3]. Isto indica que a infraestrutura não só precisa ser confiável quando submetida a uma carga padrão, mas também ser capaz de minimizar a magnitude e a duração das falhas sob condições excepcionais [4].

A mudança climática acarreta vários desafios para o setor de transporte porque este sistema é altamente vulnerável às condições climáticas e meteorológicas [5], e aos seus impactos devido à ocorrência de eventos climáticos extremos, que influenciam a vida útil da infraestrutura e a segurança do transporte [6]. Isto enfatiza a necessidade de considerar a mudança climática em projetos regulares de infraestrutura de transporte, incluindo toda a vida útil destes ativos [7]. Entretanto, as agências de transporte têm recursos financeiros limitados para a manutenção de rodovias e enfrentam demandas por infraestrutura sustentável [8]. O risco climático de uma infraestrutura de transporte depende de uma variedade de fatores, incluindo sua natureza, localização, características de projeto e práticas de construção [1]. Dessa forma, ressalta a complexidade das interações entre os diversos fatores de risco da mudança climática e de como os diversos riscos se agravam ou se multiplicam [9].

Surge então a questão de como as autoridades rodoviárias devem proceder para integrar a variável climática na gestão dos ativos usuais [10,11]. Dessa forma, torna-se necessário que os tomadores de decisão de transportes (incluindo, engenheiros rodoviários, gerentes de ativos, profissionais de adaptação à mudança climática, gerentes de inovação e gerentes de projeto) realizem uma aprofundada Análise de Risco Climático (ARC) [12,13]. Segundo o IPCC [14], as ARC devem considerar três componentes: ameaça climática, exposição e vulnerabilidade (sensibilidade e capacidade adaptativa). Esta análise deve considerar ferramentas para apoiar os tomadores de decisão usando dados observacionais e/ou experimentais e modelos de simulação de cenários para quantificar os impactos de eventos extremos e mudança climática incremental e identificar pontos quentes na rede rodoviária em qualquer localização geográfica do mundo [15].

Este estudo visa examinar diversas metodologias fundamentais de ARC no setor de transportes, enfatizando suas vantagens proeminentes e identificando desafios significativos. Além disso, destaca-se uma atenção especial à convergência dessas metodologias, proporcionando uma visão abrangente dos elementos essenciais a serem considerados em uma ARC.

2. Metodologia

Este estudo adota uma abordagem dividida em 4 etapas para examinar as metodologias fundamentais de ARC no setor de transportes, destacando vantagens proeminentes e identificando desafios significativos. A metodologia será delineada de acordo com as etapas apresentadas na Figura 1.



Figura 1. Metodologia científica.

Fonte: elaborado pelos autores.

3. Análise de Risco Climático

Os riscos climáticos afetam diretamente os ativos físicos de infraestrutura e impactam de forma significativa a economia do país [16,17], logo, qualificar e quantificar os riscos relacionados ao clima proporciona maior margem de manobra para reduzir os desastres e prejuízos em âmbito nacional [18]. Segundo exposto pelo IPCC [14], a ARC deve envolver a ameaça climática, a exposição e a vulnerabilidade (dada em função da sensibilidade e capacidade adaptativa) das infraestruturas, conforme exposto na Figura 2.

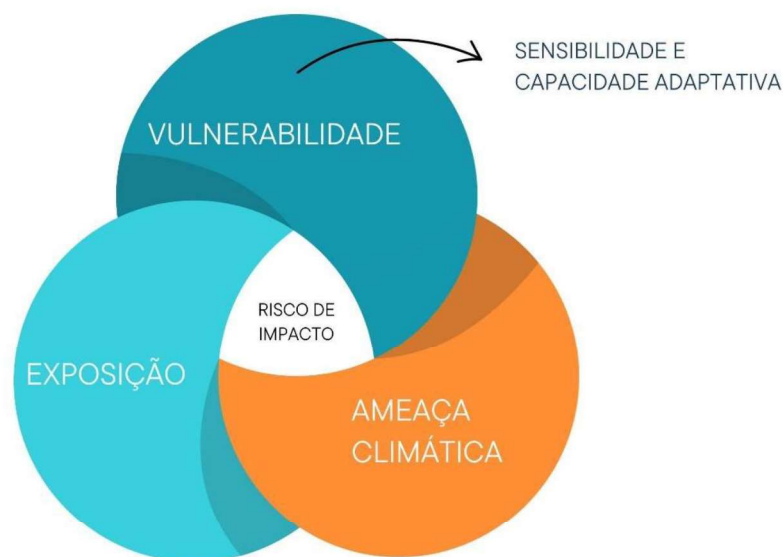


Figura 2. Modelo conceitual para análise do risco de impacto da mudança climática.

Fonte: Adaptado de IPCC (2014a).

Pela Figura 2, nota-se que o risco de impacto é o resultado emergente da interação entre suas três dimensões/componentes, que podem ser entendidas, conforme exposto pelo ADAPTABRASIL MCTI [19]:

- Ameaça: é o processo externo climático (tais como estiagem, precipitações intensas e ondas de calor) que interage com o ambiente de análise e que possuem capacidade de transformação significativa no sistema, seja ela lenta ou repentina;
- Exposição: é o grau, duração e/ou extensão a que o sistema está sujeito no contato com a ameaça climática, sendo uma propriedade relacional entre o ambiente de análise e a ameaça;
- Vulnerabilidade: é a suscetibilidade a danos potenciais para uma mudança ou uma transformação do ambiente de análise, quando confrontados com uma ameaça, e não como o resultado desse confronto. Além disso, é estabelecida em função da sensibilidade e da capacidade adaptativa, que podem ser descritas como:
 - Sensibilidade: é o grau em que o sistema em análise é afetado, adversamente ou benéficamente, por estímulos relacionados ao clima, de forma direta ou indireta; e
 - Capacidade adaptativa: é a habilidade do sistema de se ajustar a um distúrbio ou danos potenciais, aproveitando as oportunidades e lidando com as consequências de uma transformação que ocorra.

A ARC desempenha um papel crucial no setor de transportes, oferecendo benefícios significativos em face da mudança climática, conforme destacado na Tabela 1.

Tabela 1. Benefícios da realização de ARC no setor de transportes.

Benefício	Descrição
Resiliência da Infraestrutura	A ARC permite avaliar e fortalecer a resiliência da infraestrutura de transporte contra eventos climáticos extremos, como enchentes, tempestades e elevação do nível do mar. Isso é essencial para garantir a continuidade operacional e reduzir danos materiais.

Benefício	Descrição
Tomada de Decisões Informada	A compreensão dos riscos climáticos ajuda na tomada de decisões informada. Planejadores e gestores podem adotar medidas preventivas e estratégias de adaptação, minimizando os impactos adversos nos serviços de transporte.
Planejamento a Longo Prazo	A ARC permite um planejamento mais eficaz a longo prazo, considerando os cenários climáticos futuros. Isso é fundamental para garantir que as decisões de investimento e expansão da infraestrutura estejam alinhadas com as projeções climáticas.
Proteção dos Usuários	A ARC contribui para a segurança dos usuários, considerando potenciais ameaças climáticas. Isso é especialmente relevante para evitar acidentes e garantir a segurança nas rodovias, ferrovias, portos e aeroportos.
Redução de Custos de Manutenção	Ao identificar áreas propensas a desgastes acelerados devido a condições climáticas adversas, a ARC possibilita estratégias proativas de manutenção, reduzindo custos operacionais a longo prazo.
Atendimento a Requisitos Regulatórios	Com o aumento da conscientização ambiental e das regulamentações relacionadas à mudança climática, a ARC auxilia o setor de transportes a cumprir requisitos legais e normativos, promovendo práticas mais sustentáveis.

Fonte: Baseado em de Abreu [20].

Conforme evidenciado na Tabela 1, a incorporação da ARC não apenas fortalece a resiliência do setor de transportes, mas também emerge como um componente essencial para impulsionar a eficiência operacional e mitigar desafios prementes. Além disso, ao promover práticas sustentáveis, a ARC contribui significativamente para a redução da pegada ambiental, alinhando-se de maneira inovadora com os objetivos de sustentabilidade global. Essa abordagem não só atende às demandas atuais do setor, mas também oferece uma base sólida para a segurança contínua dos sistemas de transporte, promovendo um ecossistema resiliente e eficaz.

4. Metodologias de Análise de Risco Climático referentes ao setor de transportes

Uma análise abrangente das metodologias de ARC implementadas globalmente no setor de transportes serve para destacar tanto seus aspectos positivos quanto às limitações a serem superadas e assim alcançar uma ARC mais alinhada com a realidade [21,22]. Nesse contexto, a Tabela 2 oferece um resumo das principais metodologias desenvolvidas para a adaptação, concentrando-se explicitamente na infraestrutura de transporte.

As construções elaboradas foram principalmente direcionadas para fortalecer a infraestrutura física, ativos, operação, manutenção e gestão organizacional. Este método de adaptação, de forma geral, busca avaliar os impactos e vulnerabilidades da infraestrutura física e dos ativos já existentes. Além disso, procura identificar e implementar medidas para reduzir ou mitigar as vulnerabilidades decorrentes da mudança climática, levando em conta a sensibilidade e capacidade adaptativa, conforme mencionado anteriormente.

Nesse contexto, é essencial ressaltar a importância de uma abordagem proativa na gestão das consequências da mudança climática. Isso envolve não apenas a avaliação dos riscos imediatos, mas também uma análise aprofundada das tendências futuras e dos possíveis cenários de impacto. Dessa forma, as estratégias de adaptação podem ser desenvolvidas de maneira mais eficaz e abrangente, garantindo a resiliência das infraestruturas e dos sistemas organizacionais diante dos desafios climáticos em constante evolução.

Tabela 2. Metodologias de Análise de Risco Climático para o setor de transportes - mundo.

Estrutura	País de Origem	Descrição
<p><i>Climate Change and Extreme Weather Vulnerability Assessment Framework</i> [23].</p>	<p>Estados Unidos</p>	<p>Enquanto a maioria das estruturas de planejamento de adaptação concentra-se na infraestrutura em nível de sistema, a estrutura conceitual do <i>Federal Highway Administration</i> (FHWA) concentra-se na infraestrutura em nível de ativo ou projeto. Seu objetivo é identificar as principais considerações, perguntas e recursos que podem ser usados para projetar e implementar uma avaliação da vulnerabilidade à mudança climática. Ele dá uma visão geral das principais etapas na condução de avaliações de vulnerabilidade e usa exemplos de práticas para demonstrar uma variedade de maneiras de coletar e processar informações.</p>
<p><i>uRisk Management for Roads in a Changing Climate: A Guidebook to the RIMAROCC Method</i> [24].</p>	<p>União Européia</p>	<p>A estrutura RIMAROCC permite a análise e o planejamento da adaptação a nível de sistema, corredor de transportes e ativos individuais, analisando vários "domínios de especialização", tais como pavimentos, bueiros e pontes, geotecnia, meio ambiente, drenagens e nível do mar. O RIMAROCC é um método onde o objetivo é facilitar a produção de um Estudo de Gerenciamento de Risco por ou para uma autoridade rodoviária. O método pode ser usado para mitigar ameaças, reduzir vulnerabilidades e minimizar as consequências de um evento.</p>
<p><i>Climate Change Uncertainty and the State Highway Network: A Moving Target</i> [25].</p>	<p>Nova Zelândia</p>	<p>A Transit Nova Zelândia avaliou os impactos potenciais da mudança climática nas rodovias estaduais e desenvolveu uma resposta com base nas informações disponíveis. A Transit utilizou um processo de triagem em duas etapas para determinar a necessidade e a viabilidade de tomar medidas antecipadas para proteger a infraestrutura dos impactos potenciais futuros da mudança climática. A primeira etapa avaliou a necessidade de agir no presente. A avaliação revelou que a política e a prática atuais podem não ser suficientes para proteger adequadamente as pontes (e bueiros com uma vida útil de mais de 25 anos) dos impactos potenciais da mudança climática. A segunda etapa avaliou a viabilidade de agir agora para proteger as pontes rodoviárias estaduais dos impactos potenciais futuros da mudança climática.</p>

Estrutura	País de Origem	Descrição
<p><i>Scottish Road Network Climate Change Study</i> [26].</p>	<p>Escócia</p>	<p>As tendências da mudança climática na Escócia são examinadas para ver como elas podem afetar a rede rodoviária, apresentadas a partir dos domínios de projeto, operação, pesquisa adicional e revisão de políticas. Os resultados mostram que a mudança climática no futuro próximo pode ser suficientemente significativa para justificar o ajuste das práticas atuais.</p>
<p><i>RIVA – Risikoanalyse wichtiger Verkehrsachsen des Bundesfernstraßennetzes im Kontext des Klimawandels</i> [27].</p>	<p>Alemanha</p>	<p>A RIVA se concentra na avaliação dos riscos da mudança climática para a rede viária federal. O risco para a infraestrutura rodoviária decorrente da mudança climática é descrito por um modelo de indicador hierárquico e consiste em quatro dimensões: (i) Clima, (ii) Vulnerabilidade, (iii) Efeito Técnico e (iv) Criticidade. A metodologia desenvolvida permite uma análise/avaliação de risco em toda a rede com base em dados climáticos regionalizados e dados padronizados de infraestrutura rodoviária.</p>
<p><i>Climate Change Risk Assessment</i> [28].</p>	<p>Reino Unido</p>	<p>A Estratégia e Estrutura de Adaptação à Mudança Climática da Agência de Rodovias do Reino Unido destina-se a identificar e gerenciar os riscos da mudança climática na infraestrutura rodoviária e nas operações de suas agências de transporte. A Estrutura busca responder a três questões-chave: 1. Qual é o nível atual e futuro de risco ou oportunidade? 2. O risco ou oportunidade está sendo gerenciado, levando em consideração as ações do governo e outras adaptações? 3. Existem benefícios de ações posteriores nos próximos cinco anos, além do que já está planejado?</p>
<p><i>National Climate Change Adaptation Framework</i> [29].</p>	<p>Austrália</p>	<p>A Estrutura Nacional de Adaptação à Mudança Climática, que tem um objetivo de avaliar os riscos da mudança climática na costa australiana, foi aprovada pelo Conselho de Governos Australianos (do inglês, <i>Council of Australian Governments - COAG</i>) em 2007. A Estrutura estabelece o que o governo australiano fará para apoiar os esforços em todos os níveis de governo, empresas e comunidade, para melhor antecipar, gerenciar e se adaptar aos impactos da mudança climática.</p>
<p>Projeto AdaptaVias [30].</p>	<p>Brasil</p>	<p>O Projeto AdaptaVias tem como objetivo conduzir um levantamento abrangente dos impactos e riscos resultantes das alterações climáticas na infraestrutura federal de transportes terrestres com base no AR5 (IPCC, 2014) e no AdaptaBrasil [s.n], tanto nas rodovias quanto nas ferrovias, tanto as já existentes quanto às planejadas. Este levantamento</p>

Estrutura	País de Origem	Descrição
		fornece informações essenciais para embasar decisões estratégicas visando a adaptação aos impactos provocados pela mudança climática.

Fonte: Baseado em Transit New Zealand [25], Scottish Executive [26], Era-Net Road [24], U.K. Highways Agency [28], U.S. Dot [23], BASt [27], Australian Government [29], Galla [3] e Ministério dos Transportes [30] e De Abreu [20].

Ao focar nas dimensões de infraestrutura física e ativos, a estratégia de adaptação visa não apenas entender os desafios iminentes, mas também promover soluções inovadoras para fortalecer a resiliência do sistema, incluindo a implementação de tecnologias avançadas, práticas sustentáveis e a integração de abordagens eficazes de gestão de riscos. Isso não apenas fortalece a capacidade de resposta à mudança climática, mas também contribui para a promoção da sustentabilidade ambiental e para a redução do impacto negativo das atividades humanas no meio ambiente.

Além disso, a abordagem enfatiza o papel crucial do gerenciamento organizacional, buscando estabelecer estruturas eficazes que facilitem a tomada de decisões informadas e a coordenação eficiente das atividades de adaptação. Ao promover uma cultura organizacional voltada para a resiliência climática, as instituições podem fortalecer sua capacidade de resposta às mudanças ambientais, garantindo a sustentabilidade a longo prazo. De uma maneira geral, as estruturas desenvolvidas ao redor do mundo apresentam em comum os passos apresentados na Tabela 3.

Tabela 3. Etapas comuns das estruturas desenvolvidas ao redor do mundo.

Passos	Descrição
Etapa 1 - Estabelecimento do Contexto	Nessa etapa, são definidos as metas e os objetivos da ARC, é realizada a coleta de dados de infraestrutura e dados climáticos projetados, e são criados workshops ou painéis de especialistas na área (incluindo engenheiros rodoviários, gerentes de ativos, profissionais de adaptação à mudança climática, gerentes de inovação e gerentes de projeto) para entender a realidade a qual a análise está inserida.
Etapa 2 - Identificação de risco	Esta etapa busca identificar os riscos da mudança climática, que leva em consideração a exposição das infraestruturas às ameaças climáticas e suas vulnerabilidades (sensibilidades e capacidades adaptativas). Isto envolve a identificação de áreas de foco regional ou prioridades, bem como os principais sistemas de infraestrutura afetados.
Etapa 3 - Análise de Risco	Para a análise de risco, as características do impacto climático recebem classificações qualitativas (por exemplo, baixa, média, alta). Geralmente essa etapa consiste apenas no cálculo da probabilidade de ocorrência do risco e suas consequências. Outros aspectos são analisados em casos específicos.

Passos	Descrição
Etapa 4 - Avaliação de risco	Inicialmente, é necessário categorizar os resultados da análise de risco para estabelecer as prioridades de adaptação. Esse processo envolve a inserção dos dados da fase anterior em uma matriz de risco, que utiliza um sistema de coordenadas cartesianas. Nessa matriz, variáveis como probabilidade, consequência/criticidade e impacto são associadas aos efeitos das mudanças climáticas. Posteriormente, a matriz é minuciosamente analisada, e os riscos são hierarquizados. A pontuação de prioridade de risco é determinada com base na combinação de probabilidade e impacto, sendo que maior probabilidade e impacto resultam em uma pontuação de prioridade mais elevada. Existem diversas tipologias de matrizes, desde as mais simples, que categorizam áreas discretas de baixo a médio risco, até matrizes mais elaboradas ou multidimensionais. Em alguns casos, as Etapas 3 e 4 podem ser integradas em uma única fase denominada avaliação de risco.
Etapa 5 - Tratamento do Risco	Para o tratamento de riscos, deve-se identificar, avaliar e selecionar as escolhas de medidas de adaptação, e implementar a opção escolhida. No processo de identificação das estratégias de mitigação dos riscos para posterior avaliação e escolha podem ser utilizadas tabelas com classes genéricas de possibilidades de adaptação. Já para a implementação, pode-se estabelecer uma estrutura de monitoramento para coleta de dados sobre o clima, desempenho dos ativos e operações. É crucial a conexão entre o planejamento da ação adaptativa à mudança climática analisada, com os programas de gestão de ativos de transporte.

Fonte: Baseado em Galla [3] e de Abreu [20].

Muitas agências definiram as restrições de suas estruturas de adaptação baseadas em risco, bem como os obstáculos internos e externos que podem impedir a implementação da estrutura, ao mesmo tempo em que abordam o desenvolvimento destas, conforme expresso na Tabela 4. Essa abordagem visa não apenas a compreensão dos desafios envolvidos, mas também a formulação de estratégias eficazes para superá-los, tornando o processo de adaptação mais robusto e eficiente.

Tabela 4. Restrições e obstáculos das estruturas de ARC de agências de transporte ao redor do mundo.

Dificuldade	Descrição
Limitações de dados de ativos de infraestrutura ou climáticos	Essa é a principal barreira para a maioria das estruturas, sendo categorizada de acordo com a disponibilidade e acessibilidade em: (i) não disponíveis (que não foram coletados); (ii) inconsistentes (apesar de terem sido coletados, não estão completos ou padronizados); e (iii) de difícil acesso (não estão disponíveis em bases de dados de acesso aberto, apesar de existirem em bases de empresas privadas - por exemplo concessionárias).
Tratamento de riscos	A determinação dos níveis de risco considerados aceitáveis, a importância atribuída às diversas categorias de risco e seus limites – isto é, a maneira como o risco é percebido e classificado – também foram obstáculos relevantes no ponto de vista de diversas autoridades. Mostrava desafiador inclusive para os tomadores de decisão estabelecer uma relação clara entre a necessidade imediata de ação e os riscos de longo prazo ou de efeito distante.
Disponibilidade de recursos suficientes	De acordo com as agências, não havia meios financeiros suficientes para realizar o planejamento de adaptação ou para construir ou melhorar as estruturas de planejamento de adaptação, bem como, recursos humanos

Dificuldade	Descrição
Barreiras legais, políticas e regulatórias	adequados para planejar as medidas de adaptação, e existe uma relação direta entre a carência de mão-de-obra e a falta de recursos financeiros, já que receitas adicionais permitiriam a contratação de pessoal qualificado adicional. As agências de transporte enfrentam desafios ao tentar identificar os riscos associados à mudança climática, frequentemente devido à falta de compreensão dos riscos climáticos específicos que enfrentam. Adicionalmente, empresas de transporte privadas e independentes deparam-se com obstáculos regulatórios, uma vez que a aprovação de seus projetos de financiamento ou investimento requer a autorização de órgãos governamentais.
Demanda futura de transporte incerta do sistema	Para as agências, é difícil avaliar a necessidade de medidas adaptativas quando não se tem clareza sobre as demandas futuras de transportes, e as mesmas precisam fazer suposições acerca de tais demandas, de tal modo que a incerteza em torno das exigências de medidas de adaptação à mudança climática acaba sendo ampliada pelas incertezas em torno das exigências futuras de demanda. Desse modo, algumas agências (como a Agência Australiana de Transportes) optaram por não incluir os efeitos da mudança climática na demanda de viagens, concentrando seus esforços nos impactos físicos sobre a infraestrutura e os ativos.

Fonte: Baseado em Galla [3] e de Abreu [20].

Os resultados expostos na Tabela 4 indicam que a adaptação do setor de transporte à mudança climática enfrenta diversas barreiras. A escassez e inconsistência nos dados de ativos de infraestrutura e climáticos dificultam a coleta e análise necessárias. Além disso, a gestão de riscos apresenta desafios na determinação de níveis aceitáveis e na clareza da relação entre a urgência de ação e os riscos de longo prazo. A disponibilidade insuficiente de recursos financeiros e humanos, juntamente com barreiras legais e regulatórias, complica ainda mais o planejamento e a implementação de medidas adaptativas. A incerteza em torno da demanda futura de transporte adiciona complexidade, com algumas agências optando por não considerar os efeitos da mudança climática nesse aspecto. Superar essas barreiras exigirá esforços colaborativos, aprimoramento na coleta de dados e desenvolvimento de políticas adaptativas eficazes.

Superar essas barreiras críticas demandará não apenas esforços colaborativos entre diversos setores e partes interessadas, mas também um aprimoramento substancial na coleta e análise de dados históricos [20]. Além disso, é imperativo o desenvolvimento de políticas adaptativas eficazes, capazes de se ajustarem dinamicamente à mudança climática em constante evolução [12]. Essa abordagem dinâmica, que combina cooperação ampla, dados robustos e políticas ágeis, é essencial para enfrentar os desafios complexos e interconectados associados aos impactos da mudança climática [21,22]. A busca por soluções sustentáveis e resilientes deve ser guiada por uma visão de longo prazo, visando não apenas a mitigação, mas também a adaptação efetiva para garantir a sustentabilidade do nosso planeta diante das transformações ambientais [31].

Além disso, uma inovação significativa reside no reconhecimento de que os riscos podem originar-se tanto dos potenciais impactos resultantes da mudança climática quanto das respostas a elas. Essa abordagem promove um pensamento que transcende as fronteiras setoriais e regionais, estabelecendo conexões entre os fatores de risco físicos e socioeconômicos. Avançar

na avaliação dos riscos da mudança climática dessa maneira é crucial para uma tomada de decisão mais embasada, visando a redução dos impactos negativos da mudança climática [9].

5. Considerações Finais

A infraestrutura viária representa um ativo crucial para governos e economias globais, desempenhando um papel essencial no transporte de alimentos, bens de consumo e facilitação das deslocamentos humanos para trabalho, estudo e outras atividades. Estudos anteriores evidenciaram que, durante eventos climáticos extremos ou prolongados, a integridade e a segurança da infraestrutura rodoviária podem ser comprometidas. Isso ressalta a urgência de integrar considerações sobre mudança climática em projetos convencionais, abrangendo toda a vida útil de pavimentos, pontes e sistemas de drenagem, entre outras estruturas, a fim de garantir sua resiliência diante dos desafios climáticos.

Este estudo é crucial para formuladores de políticas públicas e outras partes interessadas por várias razões significativas. Primeiramente, fornece uma compreensão aprofundada das metodologias de Análise de Risco Climático (ARC) no setor de transportes, permitindo que formuladores de políticas compreendam melhor os desafios e as oportunidades relacionadas à adaptação à mudança climática. Além disso, ao destacar as vantagens e identificar desafios específicos dessas metodologias, o estudo capacita formuladores de políticas a tomar decisões informadas e estratégicas para fortalecer a resiliência da infraestrutura de transporte. A abordagem integrada enfatizada no estudo também é essencial, pois proporciona uma visão holística, facilitando a formulação de políticas abrangentes e eficazes.

A consideração abrangente dos elementos essenciais em uma ARC oferece uma base sólida para o desenvolvimento de estratégias que abordem não apenas os impactos imediatos, mas também os desafios de longo prazo relacionados à mudança climática no setor de transporte. Em última análise, esse conhecimento é fundamental para a criação de políticas públicas que promovam a sustentabilidade, a segurança e a eficiência no transporte, beneficiando a sociedade como um todo.

Referências

1. Evans, C.; Tsolakis, D.; Naudé, C. Framework to Address the Climate Change Impacts on Road Infrastructure Assets and Operations. In Proceedings of the ATRF Conference; 2009.
2. Markolf, S.A.; Hoehne, C.; Fraser, A.; Chester, M. V.; Underwood, B.S. Transportation Resilience to Climate Change and Extreme Weather Events – Beyond Risk and Robustness. *Transp Policy (Oxf)* **2019**, *74*, 174–186, doi:10.1016/j.tranpol.2018.11.003.
3. Galla, K.K. *Climate Change Risk Assessment of Road Infrastructure for the Town of Essex*; 2021;
4. Quinn, A.; Ferranti, E.; Hodgkinson, S.; Jack, A.; Beckford, J.; Dora, J. Adaptation Becoming Business as Usual: A Framework for Climate-Change-Ready Transport Infrastructure. *Infrastructures (Basel)* **2018**, *3*, 10, doi:10.3390/infrastructures3020010.
5. de Abreu, V.H.S.; Monteiro, T.G.M.; de Oliveira Vasconcelos, A.; Santos, A.S. Climate Change Adaptation Strategies for Road Transportation Infrastructure: A Systematic Review on Flooding Events. In; 2023; pp. 5–30.
6. Wang, T.; Qu, Z.; Yang, Z.; Nichol, T.; Clarke, G.; Ge, Y.-E. Climate Change Research on Transportation Systems: Climate Risks, Adaptation and Planning. *Transp Res D Transp Environ* **2020**, *88*, 102553, doi:10.1016/j.trd.2020.102553.

7. Chausson, A.; Turner, B.; Seddon, D.; Chabaneix, N.; Girardin, C.A.J.; Kapos, V.; Key, I.; Roe, D.; Smith, A.; Woroniecki, S.; et al. Mapping the Effectiveness of Nature-based Solutions for Climate Change Adaptation. *Glob Chang Biol* **2020**, *26*, 6134–6155, doi:10.1111/gcb.15310.
8. Achebe, J.; Oyediji, O.; Saari, R.K.; Tighe, S.; Nasir, F. Incorporating Flood Hazards into Pavement Sustainability Assessment. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* **2021**, *2675*, 1025–1042, doi:10.1177/03611981211014525.
9. Simpson, N.P.; Mach, K.J.; Constable, A.; Hess, J.; Hogarth, R.; Howden, M.; Lawrence, J.; Lempert, R.J.; Muccione, V.; Mackey, B.; et al. A Framework for Complex Climate Change Risk Assessment. *One Earth* **2021**, *4*, 489–501, doi:10.1016/j.oneear.2021.03.005.
10. Auerbach, M.; Herrmann, C. Adaptation of the Road Infrastructure to Climate Change. In *Materials and Infrastructures 2*; Wiley, 2016; pp. 193–206.
11. The World Bank *Integrating Climate Change into Road Asset Management*; Washington DC 20433, 2017;
12. de 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* **2022**, *14*, 8864, doi:10.3390/su14148864.
13. de Abreu, V.H.S.; Ribeiro, F.B.; Santos, A.S. Identificação de Indicadores de Vulnerabilidade Para Análise de Risco Climático Da Infraestrutura Rodoviária. . In *Via Viva* 2022; 2022.
14. Intergovernmental Panel On Climate Change – IPCC *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*; Cambridge University Press: Marlborough, MA, USA, 2014, 2014;
15. Pérez-Morales, A.; Gomariz-Castillo, F.; Pardo-Zaragoza, P. Vulnerability of Transport Networks to Multi-Scenario Flooding and Optimum Location of Emergency Management Centers. *Water (Basel)* **2019**, *11*, 1197, doi:10.3390/w11061197.
16. Ghadge, A.; Wurtmann, H.; Seuring, S. Managing Climate Change Risks in Global Supply Chains: A Review and Research Agenda. *Int J Prod Res* **2020**, *58*, 44–64, doi:10.1080/00207543.2019.1629670.
17. De Abreu, V.H.S.; Monteiro, T.G.M.; Ribeiro, F.B.; Santos, A.S. Identificação De Ameaças E Impactos Da Mudança Climática Na Infraestrutura De Transporte Rodoviário. *MIX Sustentável* **2022**, *8*, 142–156, doi:10.29183/2447-3073.MIX2022.v8.n3.142-156.
18. De Abreu, V.H.S.; de Lima, G.B.C.; Monteiro, T.G.M.; Santos, A.S. Implications of Climate Change for the Brazilian Road Infrastructure. In *COVID-19 and Climate Change in BRICS Nations* ; 2023.
19. AdaptaBrasil MCTI Sobre o AdaptaBrasil. Disponível em: <https://adaptabrasil.mcti.gov.br/>.
20. de Abreu, V.H.S. Diretrizes Para Um Plano Setorial De Adaptação Da Infraestrutura Rodoviária Brasileira Frente Aos Possíveis Impactos Da Mudança Do Clima. , 2023.
21. de Abreu, V.H.S.; Ribeiro, F.B.; Santos, A.S. Impactos Da Mudança Climática Na Infraestrutura De Transporte Rodoviário À Base De Revisão Bibliográfica. . In *Proceedings of the 35° ANPET - Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes*; 2021.
22. Abreu, V.H.S. de; Ribeiro, F.B.; Santos, A.S. Impactos Da Mudança Climática Na Infraestrutura de Transporte Terrestre à Luz de Revisão Bibliográfica Com Abordagem Bibliométrica. *Via Viva* **2021**, *4*, 20–35, doi:10.54507/viaviva.2021.01.

23. U.S. Department of Transportation - U.S. DOT *Climate Change & Extreme Weather Vulnerability Assessment Framework*; 2015;
24. Era-Net Road *Risk Management For Roads In A Changing Climate. A Guidebook to the RIMAROCC Method.*; 2010;
25. Transit New Zealand *Climate Change Uncertainty and the State Highway Network: A Moving Target*; 2005;
26. Scottish Executive Scottish Road Network Climate Change Study 2005.
27. BAST - Bundesanstalt für Straßenwesen *Risikoanalyse Wichtiger Verkehrsachen Des Bundesfernstraßennetzes Im Kontext Des Klimawandels - RIVA*; 2017;
28. U.K. Highways Agency *UK Climate Change Risk Assessment: Government Report*; 2012;
29. Australian Government *National Climate Change Adaptation Framework*; 2021;
30. Ministério dos Transportes Projeto AdaptaVias. Impactos e Riscos Da Mudança Do Clima Nos Setores Rodoviário e Ferroviário.
31. Santos, A.S.; de Abreu, V.H.S.; de Assis, T.F.; Ribeiro, S.K.; Ribeiro, G.M. An Overview on Costs of Shifting to Sustainable Road Transport: A Challenge for Cities Worldwide. In; 2021; pp. 93–121.