MÉTODOS DE AVALIAÇÃO DE RISCOS CLIMÁTICOS EM INFRAESTRUTURAS DE TRANSPORTE: UMA REVISÃO SISTEMÁTICA

ARTIGO DE REVISÃO

RODRIGUES, Vitória Xavier[1], CARMO, Cristiano Saad Travassos do[2], SALVI, Levi[3], SOUSA, Felipe Almeida de[4], FAISCA, Renata Gonçalves[5]

RODRIGUES, Vitória Xavier *et al.* **Métodos de avaliação de riscos climáticos em infraestruturas de transporte: Uma revisão sistemática**. Revista Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento. Ano. 11, Ed. 03, Vol. 01, pp. 146-171. Março de 2026. ISSN: 2448-0959. Disponível em: https://www.nucleodoconhecimento.com.br/engenharia-civil/riscos-climaticos, DOI: 10.32749/nucleodoconhecimento.com.br/engenharia-civil/riscos-climaticos

RESUMO

As mudanças climáticas podem causar impactos significativos nos sistemas de transporte, devido à sua alta vulnerabilidade a eventos climáticos extremos, os quais afetam diretamente a mobilidade urbana, a logística e a integração territorial. Sendo assim, torna-se fundamental compreender as metodologias empregadas na monitoração ambiental, com o objetivo de identificar estratégias eficazes para mitigar ou até eliminar os impactos desses eventos adversos. O presente estudo, portanto, concentra-se em investigar os principais métodos utilizados na avaliação de riscos climáticos associados aos sistemas de transporte, com base em uma revisão sistemática da literatura científica, fundamentada no protocolo PRISMA, visando garantir rigor nos processos de triagem, seleção e verificação da elegibilidade dos estudos. Assim, foram selecionados 77 (setenta e sete) artigos científicos, com base em critérios rigorosos de inclusão e exclusão. Paralelamente, foi realizada uma análise bibliométrica centrada na co-ocorrência de termos, com o objetivo de mapear tendências emergentes e estruturar os principais eixos temáticos do campo investigado. A análise do corpus revelou que entre os métodos mais destacados para a avaliação de riscos climáticos em sistemas de transporte estão técnicas de modelagem computacional por meio do uso de Sistemas de Informações Geográficas (SIG) e o desenvolvimento de modelos baseados em Inteligência Artificial (IA). Essas abordagens se destacam por sua capacidade de simular cenários complexos, integrar dados espaciais e temporais e realizar análises

preditivas com grau de precisão satisfatório. Neste contexto, observa-se que tais metodologias têm sido majoritariamente aplicadas na estimativa dos impactos de eventos climáticos extremos, como inundações, deslizamentos de terra e elevação do nível do mar, com maior ênfase nos modais rodoviário e ferroviário, em função da elevada vulnerabilidade decorrente das suas características operacionais e estruturais. Apesar dos avanços metodológicos, a revisão aponta para a necessidade de desenvolvimento de metodologias mais integradas, capazes de lidar com múltiplas variáveis climáticas e diferentes sistemas de transporte. Neste sentido, a convergência entre métodos analíticos e tecnologias emergentes surge como uma estratégia promissora para aprimorar as avaliações de risco climático e fortalecer a resiliência das infraestruturas de transporte frente aos desafios impostos pelas mudanças climáticas.

Palavras-chave: Monitoração ambiental, sistemas de transportes, modelagem computacional, sistemas de informações geográficas, inteligência artificial.

1 INTRODUÇÃO

Entre 2011 e 2020, observou-se um aumento de 1,09°C da temperatura média global da superfície terrestre, valor superior ao observado no período pós-Revolução Industrial, entre 1850 e 1900. Esse fato, indicado no sexto relatório (AR6) do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC, 2023), reforça a responsabilidade das ações humanas no aquecimento global, particularmente no que diz respeito às emissões de gases de efeito estufa. Este fenômeno tem acelerado diversas mudanças no sistema climático global, com consequências alarmantes, entre elas, a elevação do nível do mar. De acordo com o IPCC (2023), entre 1901 e 2018, o nível médio global do mar subiu cerca de 20 centímetros, com uma taxa de aumento de aproximadamente 3,7 milímetros por ano entre 2006 e 2018.

Para países litorâneos, como o Brasil, essas projeções não podem ser ignoradas. A elevação do nível do mar, combinada com eventos climáticos extremos (precipitações históricas, ressacas, ondas de calor etc.), produzem impactos regionais relevantes no país. Por exemplo, a região Sudeste, que possui uma geografia montanhosa e densamente urbanizada, tem se tornado cada vez mais vulnerável a eventos de movimentos de massa e alagamentos, de acordo o Plano Nacional de Adaptação à Mudança do Clima (PNA) de 2021.

Com isso, diversos estudos científicos vêm tratando sobre o tema: Bragagnolo, Silva e Grzybowski (2020) mapearam a suscetibilidade a deslizamentos de terra no Rio de Janeiro. Alem, Clark e Moreno (2016) estudaram o planejamento logístico para operações de socorro na região serrana do Rio de Janeiro, após os desastres de 2011. Ávila *et al*. (2016) correlacionaram o aumento de precipitação extrema ao aumento de deslizamentos e enchentes repentinas no estado do Rio de Janeiro. Embora esses estudos sejam de grande relevância humanitária, ao focar em salvar vidas, percebe-se uma possível lacuna científica na análise dos impactos desses riscos em infraestruturas urbanas críticas, especialmente no setor de transportes.

As infraestruturas de transporte são particularmente vulneráveis a eventos climáticos extremos e os danos gerados podem interromper cadeias de suprimentos e afetar a mobilidade de pessoas e bens. No estado do Rio de Janeiro, os portos de Rio de Janeiro e Itaguaí estão sujeitos a vendavais, chuvas torrenciais, ressacas e neblinas, tais eventos prejudicaram operações portuárias e a cadeia logística associada, como indicado pelo relatório da Agência Nacional de Transportes Aquaviários - ANTAQ (2021).

Entretanto, o setor de Transportes possui grande contribuição para a crise climática, sendo responsável por cerca de 24% das emissões globais de CO_2, como relatado pela ONU em 2021 (Lyu et al. 2018). As previsões indicam que, até 2040, essas emissões poderão aumentar em 40%, caso políticas sustentáveis não sejam implementadas. Adicionalmente, o volume de passageiros transportados anualmente deverá exceder 80 trilhões de passageiros-quilômetro até 2030, um aumento de 50% em relação a 2015, de acordo com o Sustainable Mobility for All (2017).

Esses desafios evidenciam a necessidade de avaliar como os riscos climáticos afetam as infraestruturas críticas e de propor soluções de mitigação. Neste contexto, o presente estudo foca na avaliação dos riscos climáticos aplicados ao setor de transportes. A literatura revela diversas abordagens para essa avaliação, incluindo o uso de plataformas de Sistemas de Informações Geográficas (SIG), como no estudo de Lyu et al. (2018) sobre riscos de inundação, modelagem computacional como observado no trabalho de Liao, Hu e Ko (2018), e redes neurais artificiais, conforme

apresentado por Khandel e Soliman (2021). Além disso, há uma tendência crescente no uso de plataformas integradoras que combinam múltiplas metodologias. Por exemplo, Habeeb *et al.* (2024) propuseram uma integração de processos de Markov com redes neurais profundas para prever eventos de inundação no Rio Tâmisa, na Inglaterra, com base em dados históricos.

Diante deste cenário, o presente artigo realiza uma revisão sistemática da literatura para entender como os riscos climáticos estão sendo avaliados no setor de transportes. A estrutura do artigo inclui uma introdução ao tema, uma explicação dos métodos utilizados na revisão, uma discussão sobre os resultados encontrados e uma conclusão que aponta para as lacunas de pesquisa e direções futuras.

2. MÉTODOS

O presente estudo adotou uma Revisão Sistemática da Literatura (RSL) para investigar o estado da arte sobre a avaliação de riscos climáticos em infraestruturas de transporte. A metodologia seguiu o protocolo PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analysis), conforme descrito por Page *et al.* (2021), amplamente utilizado para garantir rigor, organização e transparência no processo de seleção e análise de artigos. A adoção combinada da RSL com o método PRISMA permite o melhor rastreamento e documentação das etapas da revisão, minimizando o risco de omissões e vieses no processo de pesquisa.

A estrutura metodológica da RSL seguiu as etapas delineadas por Tranfield, Denyer e Smart (2003), que incluem: 1) formulação da pergunta de pesquisa, 2) localização dos estudos, 3) seleção e avaliação dos estudos encontrados, 4) análise e síntese dos artigos selecionados e 5) resposta à pergunta de pesquisa com base na consolidação dos resultados. Essas etapas proporcionam um fluxo lógico que assegura uma revisão abrangente e objetiva, orientada por critérios claramente definidos e pelo protocolo PRISMA.

Ainda, para reduzir possíveis vieses pessoais decorrentes da experiência dos pesquisadores, foi adotada uma abordagem adaptada, conforme sugerido por

Carmo e Sotelino (2023), que integra a análise bibliométrica ao processo da RSL. A análise bibliométrica permite uma visão quantitativa dos temas, autores e tendências mais abordados, proporcionando maior objetividade na seleção dos estudos mais relevantes para a pergunta de pesquisa.

2.1 FORMULAÇÃO DA PERGUNTA DE PESQUISA

A pergunta-guia que norteou a revisão foi: "Como é feita a avaliação de riscos climáticos em infraestruturas de transporte?". Essa pergunta central buscou entender as metodologias, ferramentas e abordagens empregadas na avaliação dos impactos das mudanças climáticas em sistemas de transporte, como por exemplo rodovias, ferrovias e portos.

2.2 LOCALIZAÇÃO DOS ESTUDOS

Três bases de artigos foram selecionadas para a localização dos estudos: *Portal de Periódicos CAPES*, *Scopus* e *Web of Science*. Essas bases foram escolhidas por sua relevância nas áreas de Engenharia, Ciências Ambientais e Tecnologia, além de cobrirem um amplo espectro de publicações científicas revisadas por pares.

Os termos de busca foram definidos para capturar estudos relacionados à avaliação de riscos climáticos em infraestrutura de transporte, utilizando palavras-chave como "*risk assessment*", "*transport infrastructure*" e "*extreme weather*". A Tabela 1 apresenta os termos de busca detalhados, que incluíram variações com o uso do caractere coringa (*), a fim de maximizar a abrangência das buscas. Esses termos foram aplicados aos campos de título, resumo e palavras-chave dos artigos.

Tabela 1 - Termos utilizados na string de busca, divididos pela área temática

Árvore de palavras				
Avaliação		**Risco climático**		**Infraestrutura de transportes**
"risk model*"		"climate risk*"		"transportation project*"
ou		ou		ou
"risk assessment*"		"climate change*"		"transport infrastructure*"
ou		ou		ou
"risk management*"		"extreme weather*"		"road project*"
ou	e	ou	e	ou
"climate model*”		"climate vulnerability*"		"rail project*"
ou		ou		ou
"climate impact model*"		"climate resilience*”		"transportation planning*"
				ou
				"transport network*"

Fonte: Elaborada pelos autores (2025).

2.3 CRITÉRIOS DE INCLUSÃO E EXCLUSÃO

Para garantir que apenas artigos relevantes e relacionados com a pergunta-guia fossem incluídos na revisão, foram definidos critérios de inclusão e exclusão, listados na Tabela 2. Vale ressaltar que os critérios de inclusão restringem os resultados para estudos recentes, que confirmam ou refutam estudos antigos, e publicados em inglês em revistas, visto que há maior relevância científica.

Em relação aos critérios de exclusão, o objetivo principal do filtro foi excluir artigos que, pela leitura do título ou resumo, não estavam diretamente relacionados com avaliação de riscos climáticos em infraestrutura de transportes. Alguns artigos, como por exemplo os trabalhos de Duguid et al. (2024) e Liang et al. (2024), tratam sobre a descarbonização de projetos de transporte e, então, foram excluídos da RSL. Além disso, alguns trabalhos foram excluídos por não discutirem ou aplicarem os métodos propostos em projetos de transporte.

Tabela 2 - Critérios de inclusão e exclusão da RSL

Critério	Descrição
Inclusão	Artigos publicados entre 2014 e 2024
Inclusão	Publicações em inglês
Inclusão	Estudos que tratam diretamente da avaliação de riscos climáticos em infraestruturas de transporte
Inclusão	Artigos revisados por pares, publicados em periódicos
Exclusão	Artigos que discutem a mudança climática de forma geral, sem focar em sistemas de transporte
Exclusão	Trabalhos focados exclusivamente em emissões de CO_2, sem conexão direta com a avaliação de riscos climáticos
Exclusão	Estudos não revisados por pares, como resumos de conferências ou ensaios teóricos sem evidências empíricas

Fonte: Elaborada pelos autores (2025).

2.4 PROCESSO DE BUSCA E SELEÇÃO

Seguindo o protocolo PRISMA, a busca inicial nas bases de dados resultou em 516 artigos. Após a remoção de duplicatas e a aplicação dos filtros mencionados (idioma, data e tipo de publicação), o número de artigos foi reduzido para 426. O próximo passo envolveu uma triagem manual dos títulos e resumos para garantir que os estudos selecionados estivessem diretamente relacionados à pergunta-guia. Durante essa triagem, por exemplo, percebeu-se que muitos trabalhos tratavam de temas relacionados com emissão de CO2 (por exemplo, Chen *et al.*, 2023), não aplicados especificamente para infraestruturas de transporte (por exemplo, Sari, Sulukan, e Özkan, 2021) e não tratavam de avaliação de riscos climáticos (por exemplo, Erdogan *et al.*, 2022). Portanto, após a triagem nos títulos o número de artigos foi reduzido para 161 e após a triagem pela leitura dos resumos, a amostra de trabalhos selecionados foi de 71.

Além da busca estruturada nas bases de dados, foi realizada uma busca complementar na literatura cinza, focada no tema "*green transport**", uma área de pesquisa com diversas publicações relacionadas a sistemas de transporte e

mudanças climáticas. Esta busca não estruturada resultou na inclusão de 6 artigos relevantes.

2.5 ANÁLISE E SÍNTESE DOS ARTIGOS SELECIONADOS

Ao final do processo de seleção, os 77 artigos foram escolhidos para leitura completa e análise detalhada. Estes estudos foram classificados em categorias, de acordo com os métodos e abordagens utilizados para a avaliação de riscos climáticos em infraestruturas de transporte. As categorias identificadas estão listadas e descritas na Tabela 3.

Tabela 3 - Categorias de avaliação de riscos climáticos identificadas na amostra final de artigos

	Categoria	Descrição	Exemplos de estudos
I	Modelagem computacional e simulação	Utilização de modelos hidrológicos e simulações computacionais (hidrodinâmicas, por exemplo) para prever o impacto de eventos climáticos, como inundações.	Dong, Jiang, e Yu (2021) Morsy et al. (2018)
II	Sistemas de Informações Geográficas (SIG)	Ferramentas de SIG aplicadas ao mapeamento de áreas vulneráveis a desastres climáticos, especialmente inundações e deslizamentos.	Amer (2024) Stoica-Fuchs (2021) Chen et al. (2015)
III	Inteligência Artificial (IA)	Aplicações de redes neurais artificiais para prever desastres naturais e analisar impactos em tempo real.	Patanè et al. (2024) Fatolahzadeh Gheysari e Maghoul (2024)
IV	Plataformas integradoras	Estudos que combinam múltiplas abordagens, como BIM (Building Information Modeling) e IA, para realizar uma avaliação de riscos mais abrangente e precisa.	Li et al. (2022) Poo et al. (2021)

Fonte: Elaborada pelos autores (2025).

2.6 RESULTADOS DA ANÁLISE BIBLIOMÉTRICA

A fim de entender os possíveis agrupamentos de temas e, portanto, áreas de pesquisa, o presente estudo realizou uma análise de co-ocorrência de termos. Para

tanto, foi utilizada a ferramenta VOSViewer e os termos analisados estavam presentes no título e/ou resumo dos artigos selecionados pela RSL. Foi aplicado um filtro de termos, eliminando termos genéricos ("*need*", "*effect*", etc.), termos utilizados no mecanismo de busca ("climate risk", por exemplo) e substituindo termos similares ("transportation infrastructure" é similar com "transportation network", como exemplo).

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A fim de organizar os resultados obtidos da aplicação da metodologia descrita, esta seção está organizada nas análises:

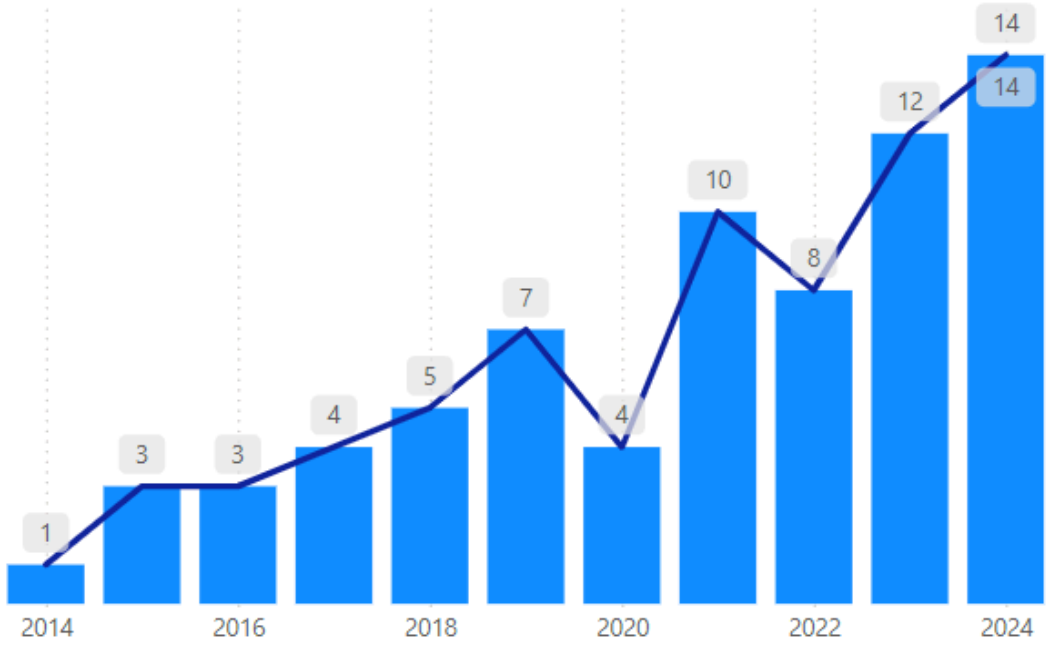
- **quantitativa**, que envolve o entendimento do crescimento do número de publicação ao longo dos anos, a distribuição geográfica dos estudos, os tipos de projetos e variável climáticas investigados;
- **bibliométrica**, que consiste na construção da rede de co-ocorrência de termos para melhor entendimento das palavras e, consequentemente, temas que são mais frequentes e suas relações entre si;
- e **qualitativa**, que consistiu em discorrer sobre os métodos de avaliação de riscos climáticos identificados nos artigos selecionados.

No final da seção, são apresentados os desafios e limitações associados aos métodos identificados na literatura, em relação as aplicabilidades regional e econômica.

3.1 ANÁLISE QUANTITATIVA

A partir da amostra final de artigos, foram analisados alguns resultados quantitativos. Em relação ao ano de publicação, percebe-se que nos últimos 10 anos, houve um crescimento no número de estudos, com uma queda no ano de 2020, possivelmente afetada pela pandemia global que direcionou vários estudos para a questão da saúde. Portanto, ignorando o *outlier* de 2020, esta tendência de crescimento (ver Figura 1) reforça a hipótese que o tema possui demanda científica.

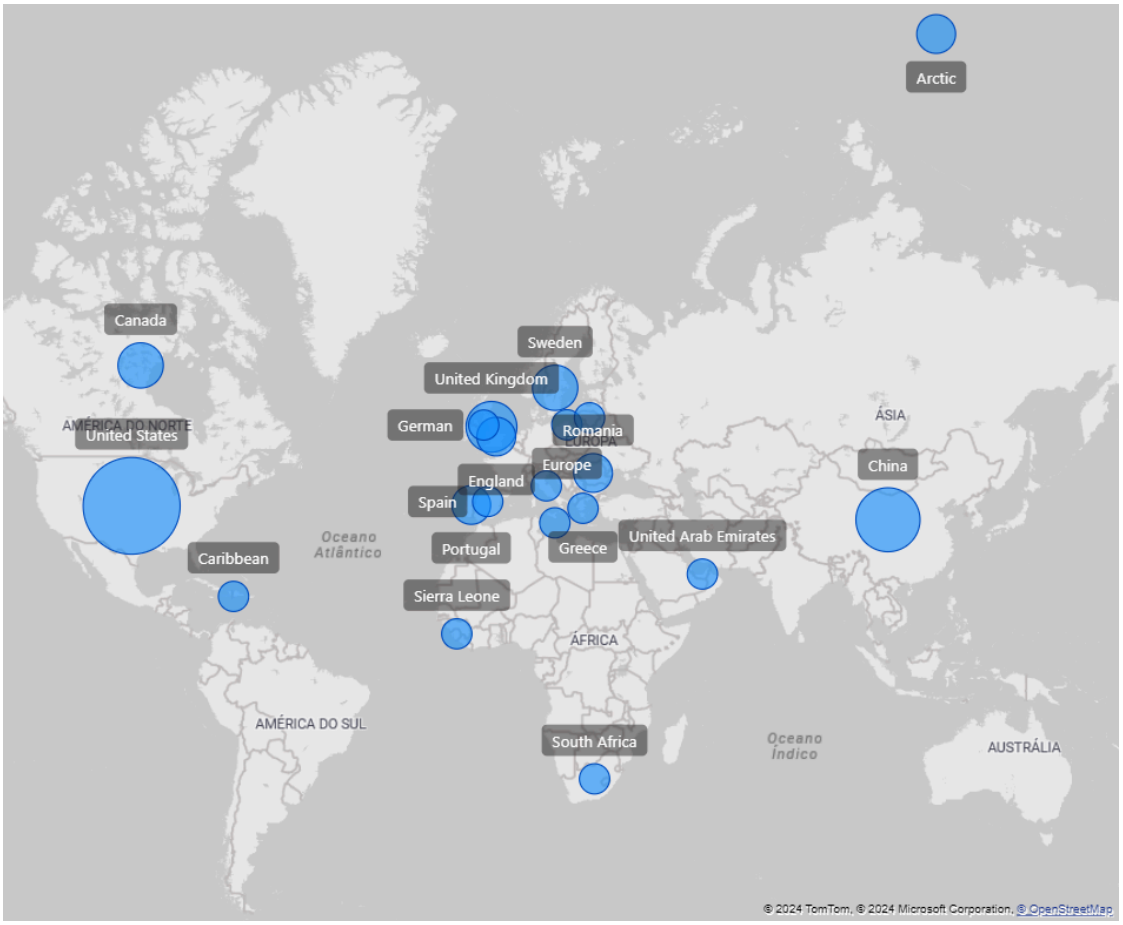
Figura 1 - Número de publicações ao longo dos anos



Fonte: Elaborada pelos autores (2025).

Em relação à distribuição geográfica, a identificação do país foi relacionada com o estudo de caso adotado no trabalho. Vale ressaltar também que 17 artigos (22% do total) não tratavam especificamente de nenhum país e, portanto, não foram considerados na plotagem da distribuição geográfica. Com isso, percebeu-se que os estudos estão concentrados no hemisfério norte global, com ênfase nos países Estados Unidos da América, países europeus e China. De fato, este resultado quantitativo é esperado devido à posição econômica global que estes países representam. No entanto, a ausência de estudos específicos em países sul-americanos e na Rússia, nas bases de dados pesquisadas, apontou uma possível lacuna científica regional, conforme ilustrado na Figura 2.

Figura 2 - Distribuição geográfica das publicações



Fonte: Elaborada pelos autores (2025).

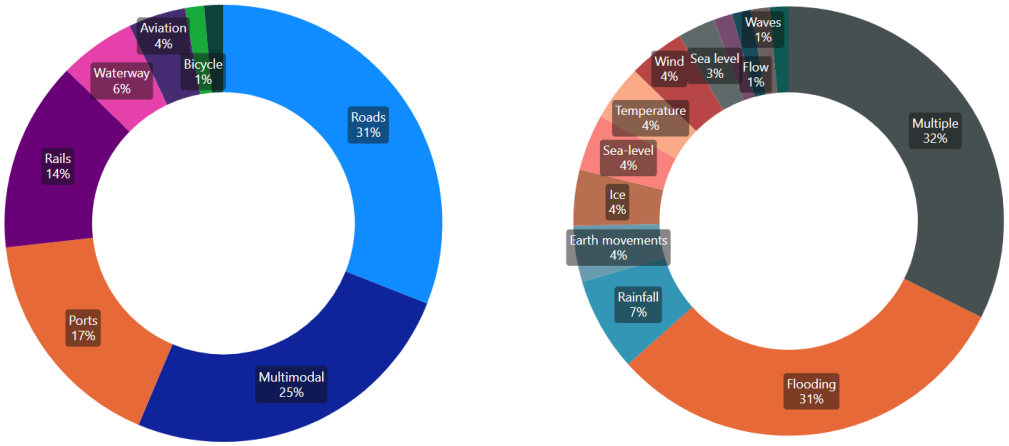
Em relação aos tipos de infraestrutura de transportes, a análise quantitativa realizada na amostra final de artigos indicou que majoritariamente os estudos focam em projetos rodoviários, ferroviários, portuários e multimodais. A ausência de um número significativo para estudos sobre hidrovias, ciclovias e aviação indica possivelmente uma lacuna acadêmica que seja justificada pela baixa representatividade desses modais no contexto mundial. Ressalta-se, porém, que localmente tais modais podem ser representativos, como é o caso de hidrovias no Brasil que são predominantes na região norte do país.

Nota-se, também, que a variável climática que possui mais estudos está relacionada com eventos de inundação, que podem ter relação com fortes precipitações, aumento do nível do mar, entre outras variáveis apontadas na Figura 3. Como as

variáveis climáticas possuem uma forte interdependência, muitos estudos tratam de múltiplas condições climáticas para a avaliação de riscos em infraestruturas de transporte. Ainda, ameaças climáticas relacionadas com alta temperatura e estiagem não são frequentemente estudadas nesta área de pesquisa.

Figura 3 - Categorização dos artigos segundo: a) tipos de infraestruturas de transportes estudadas; b) principais variáveis climáticas abordadas nos estudos

(a) (b)



Fonte: Elaborada pelos autores (2025).

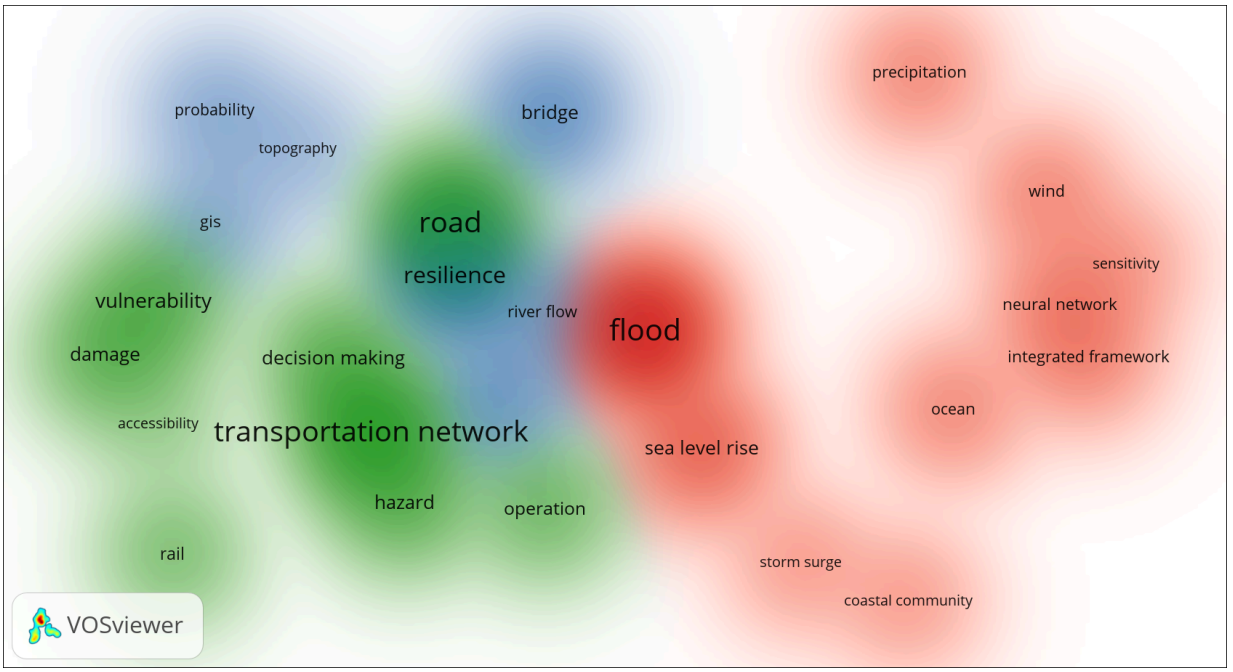
3.2 REDE BIBLIOMÉTRICA

A análise de co-ocorrência de termos apontou para três agrupamentos de termos, conforme ilustrado na Figura 4. Nota-se um tema central relacionado com inundação ("*flood*"), com alto nuvem de ocorrência e próximo aos demais termos (alta conexão entre termos). De fato, é coerente que termos como o aumento do nível do mar ("*sea level rise*") estejam próximos do termo "*flood*". Em sequência, os termos "*road*" e "*transportation network*" aparecem com alta ocorrência, próximos entre si, mas distantes de termos como "*wind*" e "*neural network*". Isto indica que os artigos selecionados em geral não tratam dessas áreas de maneira conjunta. Há coerência, por exemplo, no distanciamento do termo "*road*" com "*wind*", pois os impactos

RC: 159311
Disponível em: https://www.nucleodoconhecimento.com.br/engenharia-civil/riscos-climaticos

climáticos de vendavais em infraestruturas rodoviárias são baixos. No entanto, a desconexão com redes neurais talvez indique uma lacuna científica que possa ser explorada em futuros trabalhos.

Figura 4 - Análise de co-ocorrência de termos presentes nos artigos selecionados pela RSL



Fonte: Elaborada pelos autores (2025).

Os clusters identificados pela análise bibliométrica indicam possíveis grupos de pesquisa, conforme listado na Tabela 4. O cluster vermelho remete aos trabalhos relacionados com a sensibilidade aos eventos extremos em infraestruturas costeiras. O cluster verde está mais orientado para a vulnerabilidade de infraestruturas rodoviárias e ferroviárias. O cluster azul está relacionado com a resiliência de estruturas em contato com fluxos de água. Ainda, é possível a presença de termos relacionados com possíveis métodos de avaliação em cada cluster. A área de pesquisa sobre infraestrutura costeira possui o termo relacionado com redes neurais, ou seja, IA. A área de pesquisa sobre rodovias e ferrovias possui relação com métodos de tomada de decisão. A área de pesquisa sobre estruturas portuárias e pontes possuem termos ligados com SIG e simulação hidrodinâmica.

Tabela 4 - Grupos de termos correlacionados

Grupo	Cor	Termo	Número de ocorrências	Número de co-ocorrências
1	Vermelha	coastal community	2	5
		flood	16	23
		integrated framework	3	3
		neural network	3	8
		ocean	3	13
		precipitation	3	5
		sea level rise	6	17
		sensitivity	2	3
		storm surge	2	10
		wind	3	8
2	Verde	accessibility	2	10
		damage	6	12
		decision making	6	15
		hazard	6	15
		operation	5	15
		rail	4	7
		road	15	19
		transportation network	15	18
		vulnerability	7	14
3	Azul	bridge	6	13
		gis	3	9
		port	5	12
		probability	3	10
		resilience	10	21
		river flow	3	12

RC: 159311
Disponível em: https://www.nucleodoconhecimento.com.br/engenharia-civil/riscos-climaticos

		topography	2	11

Fonte: Elaborada pelos autores (2025).

3.3 ANÁLISE QUALITATIVA

A partir da leitura integral dos 77 artigos selecionados na revisão da literatura, foi possível constatar que a análise de vulnerabilidade dos sistemas de transporte é um dos principais temas estudados. Ainda, a maior parte dos estudos está relacionada com eventos extremos de inundação, o que está alinhado com os resultados da análise de co-ocorrência dos termos. No entanto, conforme apontado por Chen *et al*. (2015), as metodologias de avaliação de vulnerabilidade ainda apresentam limitações, como a falta de análise da capacidade das estradas e da duração dos eventos de inundações. Além disso, é apontada também uma baixa utilização de dados reais para avaliar a degradação das redes de transporte.

A pesquisa de Neumann *et al.* (2015) reforça essa perspectiva, ao propor quatro modelos para avaliar vulnerabilidades e adaptar infraestruturas críticas, como estradas e pontes, frente às mudanças climáticas. Contudo, o estudo não abordou setores críticos de transporte como a malha ferroviária, o que sugere uma lacuna em abordagens de avaliação que integrem diversos setores de transportes e diferentes condições climáticas extremas. Vale ressaltar que na área de infraestrutura ferroviária, Lyu *et al.* (2018) propuseram uma metodologia comparativa, utilizando o Processo de Hierarquia Analítica (AHP) e o AHP Intervalar (I-AHP), para avaliar o impacto de inundações na rede de metrô.

Outro estudo que se destaca na literatura sobre a infraestrutura ferroviária é o de Chinowsky *et al.* (2019), que modelou os impactos do aumento da temperatura em sistemas ferroviários. A partir do inventário e volume de tráfego ferroviário, são estudados diferentes cenários climáticos futuros e, então, estimados os riscos climáticos baseados em dados reais históricos. No entanto, apoiado também na análise quantitativa, percebe-se que os estudos encontrados pela RSL e relacionados com o setor ferroviário ainda são poucos.

Outro tema crítico observado na leitura dos artigos selecionados está relacionado com estabilidade de encostas. Dong, Jiang e Yu (2021) utilizaram o método de Random Finite Element Model (RFEM) para investigar a degradação de encostas de permafrost, demonstrando como o derretimento causado pelo aquecimento global compromete a estabilidade de rodovias e ferrovias. Observa-se, neste caso específico, uma abordagem multisetorial, portanto, mas ainda restrita a uma única variável climática.

Vale notar que alguns estudos oferecem uma abordagem com múltiplas variáveis, como por exemplo em Kalantari *et al.* (2019). Os autores desenvolveram um modelo estatístico preditivo para avaliar a probabilidade de inundações em interseções rodoviárias com rios, considerando topografia, tipos de solo e capacidade de drenagem. Porém, a metodologia foi aplicada apenas em estruturas rodoviárias, ainda que ofereça perspectivas para a extensão desses modelos preditivos a outros tipos de infraestruturas de transporte.

Dentro da categoria de infraestrutura rodoviária, foi também observado com frequência estudos sobre estruturas de pontes. Neste tipo específico de projeto de transporte, a erosão fluvial surge como um risco climático significativo para a integridade estrutural. Conforme constatado por Giurea *et al.* (2024), o impacto dos processos erosivos no Rio Gilort, na Romênia, compromete a estabilidade das pontes ao expor seus elementos estruturais.

Além das infraestruturas rodoviárias e ferroviárias, alguns estudos selecionados na RSL apontam preocupações com infraestruturas portuárias e aeroportuárias. Vogiatzis *et al.* (2021), por exemplo, avaliaram os riscos climáticos relacionados com temperaturas extremas e inundações no Aeroporto Internacional de Atenas. Diferentemente dos estudos sobre rodovias e ferrovias, que normalmente estão preocupados com questões estruturais destes sistemas, observa-se no estudo de Vogiatzis *et al.* (2021) uma maior preocupação com as questões operacionais do aeroporto. Na visão dos autores do presente artigo, esse indicativo pode estar relacionado ao maior valor agregado atribuído às operações de aeroportos e portos, que, em geral, possuem uma relevância econômica superior em comparação às

rodovias e ferrovias, onde as cargas transportadas tendem a ter menor valor agregado.

Complementando essa perspectiva, Coffel, Thompson e Horton (2017) explicam que o risco climático com o aumento das temperaturas terá impacto direto no desempenho das aeronaves, especialmente durante a decolagem, devido à redução da densidade do ar, o que diminui a sustentação gerada pelas asas. Os autores sugerem que medidas de adaptação, como o alongamento das pistas ou o reagendamento de voos para horários mais frescos do dia, podem ser necessárias para manter a eficiência operacional dos aeroportos.

Em relação aos métodos adotados para avaliação dos riscos climáticos, que são o principal objetivo da RSL, foram observadas algumas contribuições na literatura. No geral, os artigos mostram uma tendência crescente no uso de tecnologias avançadas, como a IA e modelagem computacional. Por exemplo, Kasantikul *et al.* (2018) propôs um método com Redes Neurais Artificiais (RNA) e modelos de filtro de partículas, utilizando a refletometria de satélites BeiDou, para estimar velocidades de vento sobre o oceano. Ou seja, o método proposto combinou técnicas de IA com sensoriamento remoto para avaliar os riscos relacionado com ventanias no transporte marítimo.

Outro avanço significativo é o uso de Sistemas de Informações Geográficas (SIG) para mapear áreas vulneráveis a inundações e deslizamentos de terra. Um exemplo é o estudo de Giurea *et al*. (2024), que aplicou SIG para identificar infraestruturas de transporte em risco ao longo do Vale Timiș-Cerna, na Romênia. Modelos baseados em SIG também foram aplicados para simular cenários futuros de inundação, projetando impactos significativos em estruturas portuárias, conforme observado no estudo de Amer (2024), e rodoviárias, conforme observado no estudo de Hong *et al*. (2023).

Sobre métodos mais tradicionais, foram observados alguns estudos sobre métodos estatísticos. Kalantari *et al*. (2019), por exemplo, utilizaram modelos estatísticos preditivos para avaliar a probabilidade de inundações em infraestruturas rodoviárias.

Nesse sentido, a análise qualitativa da literatura revela que a vulnerabilidade das infraestruturas de transporte a eventos climáticos extremos, como inundações, deslizamentos de terra e erosão fluvial, é uma preocupação central. Métodos de avaliação, como modelagem computacional, SIG e IA, estão sendo amplamente utilizados para prever e mitigar os impactos climáticos em infraestruturas críticas.

Vale ressaltar, ainda, que os estudos sugerem a necessidade de abordagens integradas e a adoção de tecnologias emergentes para aumentar a resiliência das redes de transporte diante das mudanças climáticas. Além disso, percebe-se que a integração de tecnologias de sensoriamento remoto, modelos computacionais avançados e dados climáticos no planejamento de infraestrutura de transporte é fundamental para avaliar os riscos climáticos. O uso de modelos preditivos, como o RFEM (Dong, Jiang e Yu, 2021) e técnicas baseadas em RNA (Kasantikul *et al.* 2018), oferece ferramentas promissoras para aumentar a resiliência das infraestruturas contra as mudanças climáticas.

Em conclusão, os estudos ressaltam o papel crucial dos sistemas avançados de gestão de dados e das estratégias de adaptação climática para garantir a sustentabilidade da infraestrutura de transporte. Seja enfrentando os desafios de um aeroporto em um clima mediterrâneo (Vogiatzis *et al.*, 2021) ou otimizando rotas de navegação no Ártico por meio de dados em tempo real (Zhang e Crabbe 2021), as pesquisas destacam a necessidade de monitoramento contínuo e adaptação proativa das malhas de transporte diante dos crescentes riscos impostos pelas mudanças climáticas.

3.4 DESAFIOS E LIMITAÇÕES

A partir das análises quantitativa e qualitativa dos artigos selecionados na RSL, nota-se uma concentração de estudos em regiões com infraestrutura rodoviária sujeitas a inundação, porém há uma carência de trabalhos sobre regiões com predominância de hidrovias, como é o caso da região Norte do Brasil. De fato, percebe-se que a maioria de estudos está direcionada para centros urbanos e, em contraste, distante de zonas rurais e remotas que enfrentam desafios climáticos e

logísticos particulares. Esta lacuna de conhecimento sobre riscos climáticos em áreas isoladas evidencia uma limitação da literatura existente para o entendimento da vulnerabilidade climática em diferentes contextos geográficos e urbanos.

É importante ressaltar também que os estudos operacionais estão mais focados em projetos portuários e aeroportuários, devido ao maior valor agregado na carga movimentada. Enquanto isso, os estudos sobre ferrovias e rodovias focam em questões estruturais e pouco relatam sobre questões operacionais. No entanto, para países nos quais a movimentação interna de cargas é feita majoritariamente por ferrovias ou rodovias, como a Rússia e Brasil, esta lacuna de escopo pode invisibilizar prejuízos dos impactos das mudanças climáticas no comércio nacional.

Do ponto de vista econômico, é importante evidenciar também a limitação de dados reais e confiáveis sobre degradação das infraestruturas de transportes devido aos eventos extremos climáticos. De fato, como a discussão do tema é relativamente recente, poucos registros de ocorrências foram mapeados ao longo dos últimos 10 anos. A escassez de dados, então, pode prejudicar a eficiência das avaliações de riscos e dos modelos preditivos.

4 CONCLUSÃO

Este estudo teve como objetivo realizar uma revisão sistemática da literatura para entender os métodos utilizados na avaliação de riscos climáticos em infraestruturas de transporte. A partir das análises quantitativa, bibliométrica e qualitativa dos estudos selecionados na RSL, foi possível identificar os principais métodos e ferramentas aplicados na área, bem como as lacunas existentes e as oportunidades de futuras pesquisas.

Respondendo à pergunta-guia, concluiu-se que os métodos mais utilizados para a avaliação de riscos climáticos em infraestruturas de transporte incluem modelagem computacional, SIG e IA. Não há predominância de estudos analíticos ou modelos matemáticos avançados na literatura. Cada um dos métodos mais frequentes oferece vantagens específicas na análise dos impactos de eventos climáticos

extremos, como inundações, deslizamentos de terra e erosão fluvial, que são as principais ameaças identificadas na literatura. Portanto, não há um método universal para avaliar riscos climáticos, diferentes impactos climáticos e infraestruturas de transporte poderão exigir diferentes abordagens.

Ainda, a modelagem computacional se destaca por sua capacidade de simular o comportamento de infraestruturas sob diferentes cenários climáticos e, assim, promovendo uma abordagem mais abrangente e multisetorial. Métodos como FEM têm sido amplamente utilizados para prever o desempenho de estradas, pontes e ferrovias em condições de temperatura e umidade extremas. Soluções SIG têm se mostrado fundamentais na identificação de áreas vulneráveis a desastres climáticos e capazes de integrar dados geoespaciais com projeções climáticas. Estes métodos, portanto, possuem uma abordagem mais integradora, auxiliando na priorização e alocação de investimentos em infraestruturas mais resilientes.

Por fim, tecnologias de IA, como aprendizado de máquina, têm ganhado relevância como uma abordagem preditiva na avaliação de riscos climáticos. Redes neurais artificiais e outras técnicas de aprendizado de máquina têm sido aplicadas para prever eventos extremos em tempo real, com base em dados históricos e condições ambientais. Essa metodologia permite uma análise preditiva mais precisa, ajudando a antecipar os impactos de eventos como tempestades e enchentes em rodovias e ferrovias.

No entanto, uma das principais lacunas identificadas nos estudos revisados é a ausência de uma abordagem híbrida, que considere simultaneamente múltiplos tipos de infraestrutura de transporte e diferentes cenários de risco. Essa limitação aponta para a necessidade de um modelo de avaliação que possua a abrangência nos métodos de modelagem, a integração das plataformas SIG e a capacidade de simular eventos futuros da IA.

Em suma, a avaliação de riscos climáticos em infraestruturas de transporte está avançando com o uso de metodologias computacionais, SIG e IA, mas ainda há um longo caminho a ser percorrido na integração dessas ferramentas para uma análise

abrangente. Como sugestão para trabalhos futuros, o presente estudo aponta para a utilização da metodologia BIM como uma possível tecnologia de integração com SIG e IA para que múltiplas variáveis e sistemas de transportes possam ser consideradas concomitante.

REFERÊNCIAS

Agência Nacional de Transportes Aquaviários e Antaq. 2021. "IMPACTOS E RISCOS DA MUDANÇA DO CLIMA NOS PORTOS PÚBLICOS COSTEIROS BRASILEIROS: RELATÓRIO FINAL". https://www.gov.br/antaq/pt-br/central-de-conteudos/estudos-e-pesquisas-da-antaq-1/Antaq_relatoriofinal04.04.22compactado.pdf.

Alem, Douglas, Alistair Clark, e Alfredo Moreno. 2016. "Stochastic Network Models for Logistics Planning in Disaster Relief". *European Journal of Operational Research* 255 (1): 187–206. https://doi.org/10.1016/j.ejor.2016.04.041.

Amer, Reda. 2024. "Assessing vulnerability and enhancing resilience of port systems in southeast Texas facing sea-level rise". *Frontiers in Built Environment* 10 (maio):1369833. https://doi.org/10.3389/fbuil.2024.1369833.

Ávila, Alvaro, Flavio Justino, Aaron Wilson, David Bromwich, e Marcelo Amorim. 2016. "Recent precipitation trends, flash floods and landslides in southern Brazil". *Environmental Research Letters* 11 (11): 114029. https://doi.org/10.1088/1748-9326/11/11/114029.

Bragagnolo, L., R.V. Da Silva, e J.M.V. Grzybowski. 2020. "Artificial Neural Network Ensembles Applied to the Mapping of Landslide Susceptibility". *CATENA* 184 (Janeiro):104240. https://doi.org/10.1016/j.catena.2019.104240.

Calvin, Katherine, Dipak Dasgupta, Gerhard Krinner, Aditi Mukherji, Peter W. Thorne, Christopher Trisos, José Romero, et al. 2023. "IPCC, 2023: Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland." First. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). https://doi.org/10.59327/IPCC/AR6-9789291691647.

Carmo, Cristiano Saad Travassos Do, e Elisa Dominguez Sotelino. 2023. "Planejamento para o imprevisto em projetos de construção: uma revisão". *Brazilian Journal of Production Engineering* 9 (4): 107–30. https://doi.org/10.47456/bjpe.v9i4.42244.

Chen, Dan, Jianan Yin, Feng Xu, Chen Huang, e Ziyu Li. 2023. "A Market-Based Framework for CO2 Emissions Reduction in China's Civil Aviation Industry".

Transport Policy 143 (novembro):150–58. https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2023.09.018.

Chen, Xian-Zhe, Qing-Chang Lu, Zhong-Ren Peng, e John Eugene Ash. 2015. "Analysis of Transportation Network Vulnerability under Flooding Disasters". *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* 2532 (1): 37–44. https://doi.org/10.3141/2532-05.

Chinowsky, Paul, Jacob Helman, Sahil Gulati, James Neumann, e Jeremy Martinich. 2019. "Impacts of Climate Change on Operation of the US Rail Network". *Transport Policy* 75 (março):183–91. https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2017.05.007.

Coffel, Ethan D., Terence R. Thompson, e Radley M. Horton. 2017. "The Impacts of Rising Temperatures on Aircraft Takeoff Performance". *Climatic Change* 144 (2): 381–88. https://doi.org/10.1007/s10584-017-2018-9.

Dong, Shaoyang, Yusheng Jiang, e Xiong Yu. 2021. "Analyses of the Impacts of Climate Change and Forest Fire on Cold Region Slopes Stability by Random Finite Element Method". *Landslides* 18 (7): 2531–45. https://doi.org/10.1007/s10346-021-01637-1.

Duguid, Brian, Cameron Archer-Jones, Chris Hendy, Ciaran Lynn, Kieran O'Connor, Ian Palmer, e Ben Sibert. 2024. "A Framework for Decarbonisation for Bridge Owners, Engineers and Designers". Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Bridge Engineering, fevereiro, 1–13. https://doi.org/10.1680/jbren.23.00031.

Erdogan, Sinan, Samuel Asumadu Sarkodie, Festus Fatai Adedoyin, Festus Victor Bekun, e Phebe Asantewaa Owusu. 2022. "Analyzing Transport Demand and Environmental Degradation: The Case of G-7 Countries". *Environment, Development and Sustainability* 26 (1): 711–34. https://doi.org/10.1007/s10668-022-02729-1.

Fatolahzadeh Gheysari, Ali, e Pooneh Maghoul. 2024. "A Framework to Assess Permafrost Thaw Threat for Land Transportation Infrastructure in Northern Canada". Communications Earth & Environment 5 (1): 167. https://doi.org/10.1038/s43247-024-01317-7.

Giurea, Alexandru-Andrei, Laura Comănescu, Cosmin Păunescu, Alexandru Nedelea, e Laurențiu Ilie. 2024. "River Erosion Impact on Transport Infrastructure in 'Gilort River Nature2000 site', Romania". *Rocznik Ochrona Środowiska* 26 (abril):137–45. https://doi.org/10.54740/ros.2024.014.

Habeeb, Bassel, Emilio Bastidas-Arteaga, Mauricio Sánchez-Silva, e You Dong. 2024. "Conditional Seasonal Markov-Switching Autoregressive Model to Simulate Extreme Events: Application to River Flow". *Environmental Modelling & Software* 178 (julho):106066. https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2024.106066.

Hong, Feng, Hui Wu, Jenny Li, e Elizabeth Paul. 2023. "Evaluation of Flood-Vulnerable Pavement Network in Support of Resilience in Pavement System

Management". *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* 2677 (8): 474–82. https://doi.org/10.1177/03611981231156934.

Kalantari, Zahra, Carla Sofia Santos Ferreira, Alexander J. Koutsouris, Anna-Klara Ahlmer, Artemi Cerdà, e Georgia Destouni. 2019. "Assessing Flood Probability for Transportation Infrastructure Based on Catchment Characteristics, Sediment Connectivity and Remotely Sensed Soil Moisture". *Science of The Total Environment* 661 (abril):393–406. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.01.009.

Kasantikul, Kittipong, Dongkai Yang, Qiang Wang, e Aung Lwin. 2018. "A Novel Wind Speed Estimation Based on the Integration of an Artificial Neural Network and a Particle Filter Using BeiDou GEO Reflectometry". *Sensors* 18 (10): 3350. https://doi.org/10.3390/s18103350.

Khandel, Omid, e Mohamed Soliman. 2021. "Integrated Framework for Assessment of Time-Variant Flood Fragility of Bridges Using Deep Learning Neural Networks". *Journal of Infrastructure Systems* 27 (1): 04020045. https://doi.org/10.1061/(ASCE)IS.1943-555X.0000587.

Li, Juanjuan, Lijun Liu, Youjia Liang, Chao He, e Jiming Jin. 2022. "An Integrated Estimating Approach for Design Wind Speed under Extreme Wind Climate in the Yangtze River Inland Waterway". Atmosphere 13 (11): 1849. https://doi.org/10.3390/atmos13111849.

Liang, Chengji, Weiwei Sun, Jian Shi, Kailai Wang, Yue Zhang, e Gino Lim. 2024. "Decarbonizing Maritime Transport through Green Fuel-Powered Vessel Retrofitting: A Game-Theoretic Approach". Journal of Marine Science and Engineering 12 (7): 1174. https://doi.org/10.3390/jmse12071174.

Liao, Tsai-Yun, Ta-Yin Hu, e Yi-No Ko. 2018. "A Resilience Optimization Model for Transportation Networks under Disasters". *Natural Hazards* 93 (1): 469–89. https://doi.org/10.1007/s11069-018-3310-3.

Lyu, Hai-Min, Wen-Juan Sun, Shui-Long Shen, e Arul Arulrajah. 2018. "Flood Risk Assessment in Metro Systems of Mega-Cities Using a GIS-Based Modeling Approach". *Science of The Total Environment* 626 (junho):1012–25. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.01.138.

Morsy, Mohamed M., Jonathan L. Goodall, Gina L. O'Neil, Jeffrey M. Sadler, Daniel Voce, Gamal Hassan, e Chris Huxley. 2018. "A Cloud-Based Flood Warning System for Forecasting Impacts to Transportation Infrastructure Systems". Environmental Modelling & Software 107 (setembro):231–44. https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2018.05.007.

Neumann, James E., Jason Price, Paul Chinowsky, Leonard Wright, Lindsay Ludwig, Richard Streeter, Russell Jones, et al. 2015. "Climate Change Risks to US Infrastructure: Impacts on Roads, Bridges, Coastal Development, and Urban Drainage". *Climatic Change* 131 (1): 97–109. https://doi.org/10.1007/s10584-013-1037-4.

Page, Matthew J, Joanne E McKenzie, Patrick M Bossuyt, Isabelle Boutron, Tammy C Hoffmann, Cynthia D Mulrow, Larissa Shamseer, et al. 2021. “The PRISMA 2020 Statement: An Updated Guideline for Reporting Systematic Reviews”. *BMJ*, março, n71. https://doi.org/10.1136/bmj.n71.

Patanè, Luca, Claudio Iuppa, Carla Faraci, e Maria Gabriella Xibilia. 2024. “A Deep Hybrid Network for Significant Wave Height Estimation”. Ocean Modelling 189 (junho):102363. https://doi.org/10.1016/j.ocemod.2024.102363.

Poo, Mark Ching-Pong, Zaili Yang, Delia Dimitriu, e Zhuohua Qu. 2021. “An Advanced Climate Resilience Indicator Framework for Airports: A UK Case Study”. Transportation Research Part D: Transport and Environment 101 (dezembro):103099. https://doi.org/10.1016/j.trd.2021.103099.

Sari, Alperen, Egemen Sulukan, e Dogus Özkan. 2021. “Analysis and Modeling the Energy System of a Chemical Tanker by LEAP”. *Journal of Ship Production and Design* 37 (01): 45–53. https://doi.org/10.5957/JSPD.07190034.

Stoica-Fuchs, Beniamin. 2021. “Assessing the Vulnerability of Transport Network to Flood Hazard Using GIS Analysis. Case Study along Orient-East Med TEN-T Corridor, on Timiș-Cerna Valley, Romania”. Present Environment and Sustainable Development 15 (2): 146–60. https://doi.org/10.15551/pesd2021152012.

Sustainable Mobility For All. Global Mobility Report 2017: Tracking Sector Performance. Washington, DC: Sustainable Mobility for All, 2017. ISBN: 978-0-692-95670-0.

Tranfield, David, David Denyer, e Palminder Smart. 2003. “Towards a Methodology for Developing Evidence-Informed Management Knowledge by Means of Systematic Review”. *British Journal of Management* 14 (3): 207–22. https://doi.org/10.1111/1467-8551.00375.

Vogiatzis, Konstantinos, Pavlos Kassomenos, Georgia Gerolymatou, Panagiotis Valamvanos, e Evdokia Anamaterou. 2021. “Climate Change Adaptation Studies as a Tool to Ensure Airport’s Sustainability: The Case of Athens International Airport (A.I.A.)”. *Science of The Total Environment* 754 (fevereiro):142153. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142153.

Zhang, Zhihua; Crabbe, M. James C. Management of environmental streaming data to optimize Arctic shipping routes. Arabian Journal of Geosciences, v. 14, n. 15, artigo 1441, 2021. DOI: https://doi.org/10.1007/s12517-021-07782-0

INFORMAÇÕES SOBRE OS AUTORES

[1] Graduanda em Engenharia de Recursos Hídricos e Meio Ambiente. ORCID: 0009-0002-9239-3026. Currículo Lattes: https://lattes.cnpq.br/4666907446380636.

[2] Doutorado em Engenharia Civil; Mestrado em Engenharia Civil; Graduação em Engenharia Civil. ORCID: 0000-0003-1517-2457. Currículo Lattes: http://lattes.cnpq.br/0197310834738778.

[3] Doutorado em Engenharia Elétrica; Mestrado em Engenharia Elétrica; Graduação em Engenharia Elétrica. ORCID: 0000-0001-7661-5931. Currículo Lattes: https://lattes.cnpq.br/2712244007489051.

[4] Doutorado em Engenharia Civil; Mestrado em Engenharia de Biossistemas; Graduação em Engenharia Civil. ORCID: 0000-0002-4344-7342. Currículo Lattes: http://lattes.cnpq.br/3511310425977446.

[5] Doutorado em Engenharia Civil; Mestrado em Engenharia Civil; Graduação em Engenharia Civil. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6178-0990. Currículo Lattes: http://lattes.cnpq.br/3477740011608862.

Contribuição dos autores:

Vitória Xavier Rodrigues: Planejamento, redação do trabalho, análise, interpretação.

Cristiano Saad Travassos do Carmo: Concepção, análise, interpretação, revisão do trabalho, supervisão.

Levi Salvi: Planejamento, revisão do trabalho.

Felipe Almeida de Sousa: Interpretação, revisão do trabalho.

Renata Gonçalves Faisca: Revisão do trabalho.

INFORMAÇÕES SOBRE O MATERIAL

Conflito de interesse:

Não possui.

Agradecimentos:

Não possui.

Financiamento:

Não possui.

Nota de presença de IA:

Nosso relatório identificou a presença de inteligência artificial para correção gramatical e ortográfica. No entanto, os autores informaram que não a utilizou. Os autores se responsabilizam pelo material.

Informações sobre Direitos Autorais e Licença:

Este é um artigo de Acesso Aberto distribuído sob os termos da Creative Commons Attribution License, que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor e a fonte originais sejam creditados.

Os nomes e endereços informados nesta revista serão usados exclusivamente para os serviços prestados por esta publicação, não sendo disponibilizados para outras finalidades ou a terceiros.

- ISSN (versão eletrônica): 2448-0959
- Licença Creative Commons: Este trabalho está licenciado com uma Licença Creative Commons – Atribuição 4.0 Internacional.

Histórico da Publicação:

Material recebido: 18 de novembro de 2024.

Material aprovado pelos pares: 06 de maio de 2025.

Material editado aprovado pelos autores: 17 de março de 2026.