

## MEDIDAS DE ADAPTAÇÃO FRENTE AOS POSSÍVEIS IMPACTOS DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS NO SISTEMA DE TRANSPORTES: UMA REVISÃO DA LITERATURA

**Daniela Quintaes Louvain Trindade**

**Victor Hugo Souza de Abreu**

**Andrea Souza Santos**

Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ)

Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa em Engenharia (COPPE)

### RESUMO

A mudança do clima global é o maior desafio a ser enfrentado pela humanidade neste início de século. A trajetória de desenvolvimento mundial depende do grau de alteração das variáveis climáticas e de sua distribuição no espaço. Parte-se do pressuposto de que a mudança já está ocorrendo e que, provavelmente não é mais possível revertê-la. Desse modo, entende-se a necessidade de adaptação, que conceitualmente se refere a ajustes em sistemas naturais ou humanos, frente aos impactos climáticos, atuais ou esperados, e seus efeitos. As medidas de adaptação têm a possibilidade de influenciar o risco por meio da redução da vulnerabilidade e/ou exposição dos sistemas, como o sistema de transportes. Embora seja necessário desenvolver projetos que busquem investigar essa problemática, existem poucos estudos científicos que abordem especificamente medidas de adaptação nos sistemas de transportes. Desta forma, este artigo busca identificar os principais estudos publicados sobre esse assunto, avaliados por meio de criteriosos filtros de inclusão e qualificação, bem como realizar análises sistemáticas sobre eles e destacar as principais medidas de adaptação presentes naqueles mais citados. Os resultados mostram, por exemplo, que há uma expansão do tema, com ápice no número de publicações em 2016 e de citações em 2018. Além disso, as análises dos possíveis impactos e das medidas de adaptação às mudanças climáticas avaliam eventos extremos tais como tempestades, precipitações intensas, inundações, ondas de calor, nevascas e temperaturas adversas.

### ABSTRACT

The global climate change is the biggest challenge to be faced by humanity at the turn of the century. The world development trajectory depends on the degree of change of climatic variables and their distribution in space. It is assumed that change is already taking place and that it is probably no longer possible to reverse it. Thus, the need for adaptation measures is understood, that refers to adjustments in natural or human systems facing current or expected climate impacts and their effects. Adaptation measures has the potential to influence risk by reducing vulnerability and/or exposure of systems, such as the transport system. Although it is necessary to develop projects that seek to investigate this problem, in the literature, there are few scientific papers that specifically address on adaptation measures in transport systems. Therefore, this paper seeks to identify the main studies on this subject, evaluated through careful inclusion and qualification filters, as well as to perform statistical and systematic analysis on them and highlight the main adaptive measures present in those most cited. The results show, for example, that there is an expansion of the theme, with an increase in the number of publications in 2016 and citations in 2018. In addition, analyzes of the impacts and adaptation measures evaluate extreme events such as storms, floods, heat waves, intense precipitation, snowfall and adverse temperatures.

### 1. INTRODUÇÃO

A mudança climática é definida como uma modificação no estado do clima, direta ou indiretamente, atribuída a atividades humanas que alteram a composição da atmosfera global e que ocorre em adição à variabilidade climática natural, observada em períodos de tempo comparáveis (IPCC, 2014). A variabilidade climática natural e a mudança climática global são caracterizadas pela ocorrência de eventos extremos, tais como, variações de temperaturas extremas, aumento da intensidade de precipitação, tempestades e inundações.

A literatura mais recente disponível sobre o tema mostra que o setor de transportes é altamente sensível às condições de tempo e clima. A infraestrutura de transporte é vulnerável às condições extremas de temperatura, precipitação, enchentes e tempestades, que podem levar a danos nos diversos modos de transporte, tais como, rodoviário, ferroviário, aéreo e

aquaviário. Há previsões de que as mudanças climáticas poderão afetar os sistemas de transportes em âmbito global, impedindo potencialmente a mobilidade urbana, com drástica consequência para o crescimento da economia e qualidade de vida das populações (PBMC, 2013).

A exposição aos eventos extremos e seus impactos podem variar, por exemplo, por região, modo de transporte, localização/elevação e condição da infraestrutura de transportes (IPCC, 2012). Enquanto os esforços de mitigação são essenciais para reduzir a ameaça das mudanças climáticas, medidas de adaptação para aumentar a resiliência e a proteção dos impactos ambientais devem ser aceleradas (Oswald e Mcneil, 2012).

Nesse sentido, torna-se imprescindível o conhecimento das tendências futuras do comportamento do sistema climático e dos impactos que podem surgir frente a essas mudanças, de modo a permitir o planejamento e a implementação de políticas de adaptação às mudanças climáticas e de mitigação dos seus efeitos, particularmente, no setor de transportes.

Diante deste contexto, este artigo tem como objetivo verificar, na base dados *Web of Science*, que apresenta um alcance e cobertura satisfatórios (Chen, 2010), quais são os artigos mais relevantes sobre os possíveis impactos e as medidas de adaptações no sistema de transportes frente às mudanças climáticas, utilizando uma análise sistemática que verifica desde a evolução no número de publicações e citações por ano até os principais resultados dos artigos mais relevantes sobre o assunto.

Para cumprir seus objetivos, este estudo encontra-se estruturado da seguinte forma. A Seção 1 trata da contextualização, da problemática e dos objetivos do trabalho. A Seção 2 apresenta um apanhado geral sobre mudanças climáticas, os possíveis impactos no setor de transporte e medidas de adaptação frente a esses impactos. A Seção 3 aborda o procedimento metodológico utilizado para condução das buscas bibliográficas. A Seção 4 apresenta e discute os resultados. E por fim, a Seção 5 contém as considerações finais.

## **2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

O último relatório de avaliação do Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC AR5) afirma que o aquecimento do clima global é evidente, com mudanças observadas desde os anos 1950 sem precedentes no último milênio. Cada uma das três últimas décadas tem apresentado sucessivamente as temperaturas de superfície mais quentes que as décadas precedentes desde 1850.

Além disso, foram observadas mudanças nos eventos climáticos extremos a partir de 1950. As análises indicam grande possibilidade de o planeta estar experimentando aumento da frequência de ondas de calor em partes da Europa, Ásia e Austrália, e de que haja mais regiões com aumento na frequência e intensidade de chuvas (IPCC, 2013). Essas mudanças observadas no clima e as projeções futuras indicam que os riscos à perda de vidas humana e de outras espécies, como também ao colapso das infraestruturas deverão ser elevados.

IPCC (2012) ressalta que desastres poderão ocorrer com maior frequência em virtude dos impactos de eventos climáticos extremos. Eventos extremos ocorrem quando valores, frequência e associação temporal das observações registram um aumento ou uma diminuição significativa durante um determinado estado climático (Marengo, 2009).

As mudanças projetadas para as variáveis precipitação e temperatura implicariam possíveis mudanças em termos de inundações, embora, as projeções ainda sejam consideradas de “baixa confiabilidade”. A confiança é baixa devido a evidências limitadas e porque as causas das alterações regionais são complexas (ex. uso e cobertura do solo e urbanização). Ainda que exceções ocorram, existe uma confiabilidade média que projeta aumentos de chuvas relacionados ao aumento de inundação local em algumas bacias ou regiões (IPCC, 2012).

Há consenso em que, mesmo diante da incerteza relativa à dimensão e distribuição espacial dos fenômenos climáticos, é preciso avançar em ações que aumentem a resiliência das estruturas que balizam a vida e a economia. O setor de transporte apresenta forte interação com as mudanças climáticas, e gera impactos que podem ser agrupados em duas categorias: (i) aqueles originários pelo setor, tais como as emissões de gases de efeito estufa e poluentes (efeitos negativos sobre o aquecimento global); e (ii) aqueles causados pelas mudanças climáticas sobre o setor de transporte (Santos e Ribeiro, 2015).

As inter-relações entre o setor de transporte e as mudanças climáticas, seja na contribuição do setor para o aquecimento global, como nos possíveis efeitos que a mudança e a variabilidade de clima podem ocasionar sobre a mobilidade e a infraestrutura de transportes correspondente, sinalizam para a importância dos instrumentos de planejamento em diversos níveis, como medidas necessárias para o êxito de ações de mitigação e adaptação. As autoridades de transporte estão cada vez mais diante de decisões desafiadoras sobre como projetar, planejar e gerenciar a infraestrutura para enfrentar mudanças climáticas e eventos climáticos extremos (Rowan *et al.*, 2013).

Estradas, ferrovias, pistas de aeroportos, terminais de transporte, canais e pontes são exemplos de instalações e estruturas necessárias para a prestação de serviços de transporte que permitem a movimentação de passageiros e mercadorias. Eventos meteorológicos e de clima poderão afetar o planejamento, projetos, construção, manutenção e desempenho da infraestrutura ao longo de sua vida útil (USDOT, 2002). Nas atividades de transporte, condições meteorológicas adversas implicam num aumento no tempo médio de viagem, em congestionamentos, e numa maior probabilidade de ocorrência de acidentes. Por isso, os custos generalizados de transporte são afetados (Koetse e Rietveld, 2007).

Koetse e Rietveld (2007) consideram que são escassos os estudos que enfocam diretamente os impactos das mudanças climáticas ou da variação sazonal das condições meteorológicas em transportes. Segundo USDOT (2002), poucos estudos sobre impactos climáticos têm sido realizados nos Estados Unidos com foco no transporte, mas avaliações vêm sendo realizadas pelo Canadá e Reino Unido e, em larga escala, as avaliações do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas - IPCC sugerem profundas implicações nos sistemas de transportes.

Até recentemente, a maioria dos resultados de pesquisas sobre clima e transportes apresentada foi relacionada à mitigação, com questão central sobre a eficácia e eficiência das medidas para reduzir os impactos ambientais dos transportes (IPCC, 2007). Atualmente é possível observar uma tendência em que os tomadores de decisão começam a aceitar o fato da mudança climática e da necessidade de explorar estratégias de adaptação relacionadas, tais como, a implementação de medidas políticas para reduzir os custos dos danos potenciais relacionados

(Koetse e Rietveld, 2007). Uma observação importante é que as medidas de mitigação e estratégias de adaptação estão inter-relacionadas: grandes oportunidades de mitigação têm implicações para a urgência de se implementar medidas de adaptação.

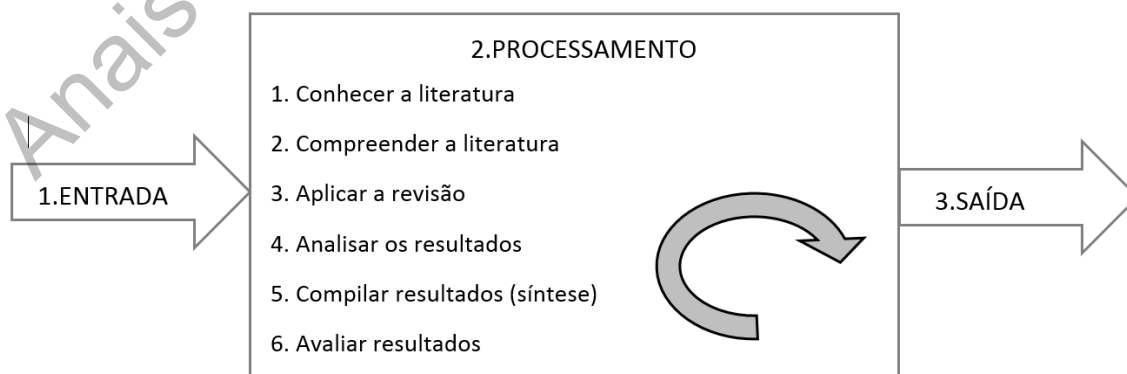
Dessa forma, o planejamento de transportes deverá considerar medidas de adaptação para garantir a mobilidade das populações. Mobilidade resiliente se refere à necessidade de aumentar a resiliência climática dos sistemas de transporte (TRL, 2011). De acordo com o PBMC (2013), as oportunidades de adaptação para o sistema de transporte podem estar associadas às ações de mitigação, com investimentos na melhoria da infraestrutura (realocação de estradas e vias, mudanças nos projetos e substituição e adequação de estruturas, como pontes, estradas e pavimentos) e diversificação da matriz de transporte (existência de rotas alternativas ou diversificação dos modais).

### 3. PROCEDIMENTO METODOLÓGICO

O procedimento metodológico deste artigo adota uma abordagem de Revisão Bibliográfica Sistemática (RBS) para mapeamento dos principais estudos sobre os impactos e as possíveis medidas de adaptação nos sistemas de transportes frente às mudanças climáticas. Para Bereton *et al.* (2005) uma revisão sistemática permite ao pesquisador uma avaliação rigorosa e confiável das pesquisas realizadas dentro de um tema específico.

A RBS visa identificar, avaliar e integrar todos os resultados de estudos individuais relevantes, conforme critérios de inclusão e qualificação, que abordam uma ou mais questões relacionadas ao estudo proposto (Abreu, 2017). Para Levy e Ellis (2006), conhecer o atual estágio do corpo de conhecimento sobre o assunto que se pretende estudar é o primeiro passo em um projeto de pesquisa.

Levy e Ellis (2006) descrevem uma revisão sistemática por meio de um processo que se divide em três principais fases: Entrada, Processamento e Saída. Na fase “Entrada” estão as informações preliminares que serão processadas, por exemplo: fontes primárias na área de estudo, livros-texto que compilam conhecimento na área, artigos de referência indicados por especialistas. Também inclui o plano de como será conduzida a RBS, ou seja, o protocolo da RBS que se refere ao documento que descreve o processo, técnicas e ferramentas que serão utilizadas durante a fase de Processamento, que irá gerar as “Saídas”, na forma de relatórios, síntese dos resultados, etc.. A Figura 1 ilustra as três fases de uma RBS, conforme sugerido por Levy e Ellis (2006).



**Figura 1:** Fases de uma revisão bibliográfica.

Fonte: Adaptado de Levy e Ellis (2006).



Segundo este protocolo, a revisão sistemática é cíclica, através de seis etapas que podem ser repetidas quantas vezes forem necessárias, conforme a necessidade do pesquisador, para alcançar os objetivos da pesquisa bibliográfica e, à medida que o conhecimento sobre o assunto aumenta, os ciclos são realizados de maneira mais eficiente.

Com base nessas etapas descritas por Levy e Ellis (2006), a Tabela 1 (baseada em Abreu e Ribeiro, 2019) apresenta a descrição da estratégia de pesquisa para identificar os termos utilizados (obtidos por meio da pesquisa preliminar de fontes primárias), critérios de inclusão e qualificação, assim como os detalhes para a busca e extração do banco de dados.

**Tabela 1:** Descrição da estratégia de pesquisa.

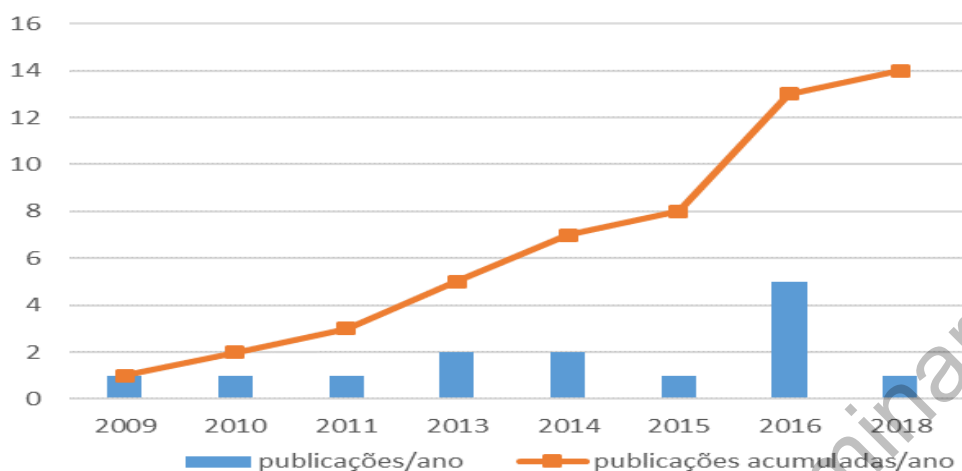
Critério	Descrição
Tópico <sup>1</sup>	<i>TS = ("climat*chang*" AND "vulnerabilit*" AND "adapt*" AND "transport*" AND "impact*")</i>
Base de Dados	<i>Web of Science</i>
Indexes	SCI-EXPANDED <sup>2</sup> , SSCI <sup>3</sup> , A&HCI <sup>4</sup> , CPCI-S <sup>5</sup> , CPCI-SSH <sup>6</sup> , ESCI <sup>7</sup>
Inclusão	(I) Tempo de cobertura: todos os anos da base de dados (1945 – 2019); (II) Enquadramento com o objetivo proposto; (III) Fator de impacto do periódico; e (IV) Tipos de documentos: somente artigos.
Qualificação	(I) A pesquisa apresenta uma revisão bibliográfica bem fundamentada? (II) O estudo apresenta inovação técnica? (III) As contribuições são discutidas? (IV) As limitações são explicitamente declaradas? e (VI) Os resultados e conclusões são consistentes com os objetivos pré-estabelecidos?
Data do Estudo	09 de Maio de 2019, às 09h00minh

Notas: (1) TS = Tópico, que significa as palavras que serão pesquisadas nos títulos, resumos e palavras-chave dos artigos. (2) *Science Citation Index Expanded* (SCIEXPANDED) cobrindo publicações desde 1945 a 2019. (3) *Social Science Citation Index* (SSCI) centra-se nas ciências sociais, cobrindo publicações desde 1956 a 2019. (4) *Arts & Humanities Citation Index* (A & HCI) é um índice de citação da área de Artes e Humanidades, cobrindo publicações desde 1975 a 2019. (5) Abrange a literatura de procedimentos de conferências de todas as áreas técnicas e científicas, cobrindo publicações desde 1991 a 2019. (6) Abrange a literatura de procedimentos de conferências de todos os campos das ciências sociais, Artes e Humanidades, cobrindo publicações desde 1991 a 2019. (7) Sobre publicações desde 2015 a 2019, este índice contém registros de artigos em periódicos não coberto pela SCI-EXPANDED, SSCI e A&HCI ainda (Thomson Reuters, 2016).

#### 4. RESULTADOS

A partir da busca realizada no banco de dados *Web of Science*, constatou-se que apenas 14 publicações estavam aptas a serem incluídas no repositório da pesquisa (atendiam aos critérios de inclusão e qualificação, aplicabilidade e qualidade).

A Figura 2 mostra a evolução das publicações sobre o assunto em estudo ao longo do tempo. Verifica-se que a primeira publicação foi registrada em 2009, levando a entender que este é um assunto muito recente na literatura mundial. Além disso, houve ápice no número de publicações em 2016.



**Figura 2:** Evolução das publicações sobre o assunto em estudo.

Torna-se também pertinente avaliar os artigos por periódico de publicação de modo a identificar quais são as revistas que mais se interessam pelo assunto, bem como o fator de impacto de cada uma delas. Nesse sentido, a Tabela 2 apresenta os periódicos que publicaram estudos sobre o assunto.

**Tabela 2:** Principais periódicos sobre o assunto.

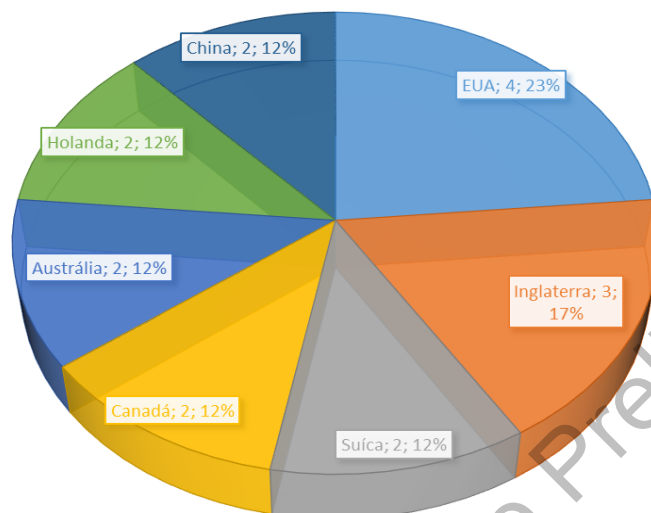
Periódicos de Publicação	P <sup>1</sup>	FI <sup>2</sup>
<i>European Journal of Transport and Infrastructure reasearch</i>	4	1,095
<i>Transportation Research Record</i>	3	0,695
<i>International Journal of Shipping and Transport Logistics</i>	1	0,928
<i>Journal of Public Transportation</i>	1	0,732
<i>Journal of Transport Geography</i>	1	2,699
<i>Road Transport Research</i>	1	0,021
<i>Transportation Research Part A – Policy and Practice</i>	1	3,026
<i>Transportation Research Part D – Transport and Environment</i>	1	3,445
<i>Transportation Research Part E – Logistics and Transportation Review</i>	1	3,289

Notas: (1) P (Publicações) refere-se ao quantitativo de artigos publicados no periódico sobre a área de interesse investigada. (2) FI (Fator de Impacto) é um método para avaliar a importância de periódicos científicos em suas respectivas áreas. Os valores apresentados na Coluna FI correspondem ao ano de 2017.

Analisando a Tabela 2, foi possível perceber que os periódicos que mais se interessam pelo assunto são: *European Journal of Transport and Infrastructure*, com 4 publicações e *Transportation Research Record*, com 3 publicações. Ressalta-se que ao ordenar os periódicos por fator de impacto, identifica-se que aqueles mais relevantes são: *Transportation Research Part D - Transport and Environment*, *Transportation Research Part E - Logistics and Transportation Review* e *Transportation Research Part A - Policy and Practice*.

Este artigo levou em consideração quais os países de origem das Instituições de Ensino dos autores que mais desenvolvem artigos relevantes sobre o assunto. A Figura 3 apresenta os países com maior volume de publicações, sendo este maior ou igual a dois. É possível notar que os países que mais publicam estudos sobre este tema são: EUA, com 4 publicações,

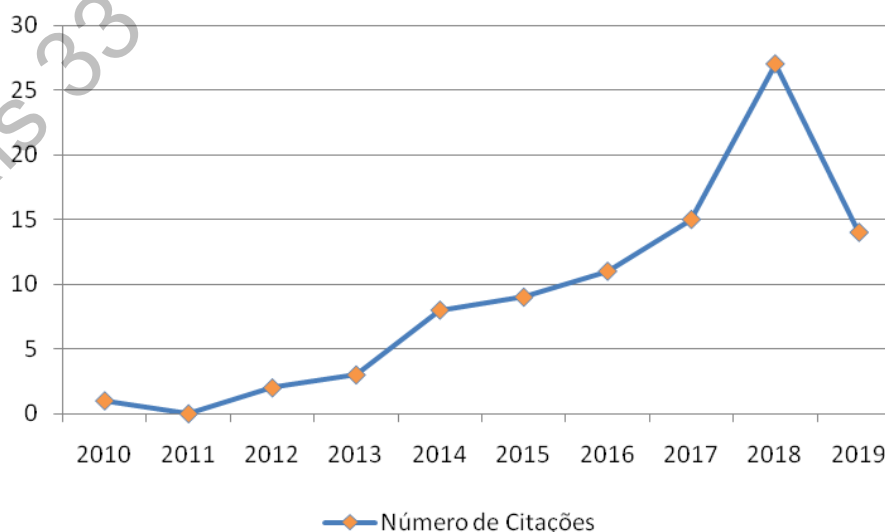
Inglaterra, com 3 publicações, e Austrália, Canadá, Holanda, China e Suíça, com 2 publicações cada. Salienta-se ainda que os seguintes países apresentaram uma publicação diretamente relacionada ao tema: Bangladesh, Alemanha, Finlândia, Grécia, Japão, Suécia e País de Gales.



**Figura 3:** Principais países de origem dos artigos mais relevantes sobre o assunto.

foi possível identificar que nenhum artigo sobre o assunto é originário de Instituições de Ensino brasileiras, mesmo essa temática sendo de suma importância. Destaca-se, entretanto, que os estudos encontrados na pesquisa se limitam à base de dados, ao termo de busca e aos critérios de inclusão utilizados, dessa forma, podem ter ficado de fora estudos brasileiros desenvolvidos em congressos e em trabalhos de fim de curso (monografia, dissertação ou tese), por exemplo.

Outra análise importante refere-se ao número de citações por ano, conforme apresentado na Figura 4. Observa-se que o número de citações cresceu com o passar dos anos, a partir de 2010, atingindo o ápice em 2018. Destaca-se ainda que, ao todo, foram identificadas 91 citações.



**Figura 4:** Evolução das citações por ano.

Ainda em relação ao número de citações, considerou-se a importância de identificar os artigos mais citados na base de dados, conforme apresentado na Tabela 3. Para esta análise, só foram enumerados os artigos com número de citações maior que cinco.

**Tabela 3:** Artigos mais citados sobre o assunto.

Título	Referência	Periódico	C <sup>1</sup>	MCA <sup>2</sup>
<i>Climate Adaptation of Railways: Lessons from Sweden</i>	Lindgren <i>et al.</i> (2009)	<i>European Journal of Transport and Infrastructure Research</i>	22	2,00
<i>Assessing the Sensitivity of Transportation Assets to Extreme Weather Events and Climate Change</i>	Rowan <i>et al.</i> (2013)	<i>Transportation Research Record</i>	10	1,43
<i>Inter-city travel behaviour adaptation to extreme weather events</i>	Lu <i>et al.</i> (2014)	<i>Journal of Transport Geography</i>	9	1,50
<i>Increasing the resilience of air traffic networks using a network graph theory approach</i>	Dunn <i>et al.</i> (2016)	<i>Transportation Research Part E – Logistics and Transportation Review</i>	8	2,00
<i>Evaluating infrastructure resilience to extreme weather - the case of the Dutch electricity transmission network</i>	Bollinger <i>et al.</i> (2016)	<i>European Journal of Transport and Infrastructure Research</i>	7	1,75

Notas: (1) C (Citações) refere-se à quantidade de artigos que mencionam o artigo analisado. (2) MCA (Média de Citações por Ano) refere-se ao valor médio obtido pelo número de citações totais dividido pelos anos decorrentes desde sua publicação.

A fim de esclarecer sobre os principais assuntos analisados em artigos sobre a temática, busca-se apresentar um breve resumo sobre cada um dos estudos mais relevantes da base de dados, ou seja, aqueles identificados na Tabela 3.

Lindgren *et al.* (2009) estudam a vulnerabilidade futura às mudanças climáticas do sistema de transporte ferroviário sueco e sua capacidade de adaptação. A combinação de um horizonte de longo prazo no planejamento e uma demanda crescente esperada pelo tráfego ferroviário levanta muitas questões sobre como a adaptação às mudanças climáticas pode ser contabilizada no planejamento, projeto e gerenciamento futuro das ferrovias. Foram documentados os pontos de vista (por meio de pesquisa de opinião) sobre vulnerabilidade e adaptação às mudanças climáticas para as ferrovias suecas que também são úteis ao contexto ferroviário europeu em geral. Os resultados sugerem, por exemplo, que: (i) Se o mapeamento sistemático de diferentes tipos de ameaças climáticas, vulnerabilidades e suas consequências não tiver sido realizado, isso deve ser feito para orientar a implementação de medidas de adaptação. Esse mapeamento também ajudaria na priorização de esforços para reduzir a

vulnerabilidade; (ii) As mudanças climáticas devem ser consideradas nos estágios iniciais do processo de planejamento e ser incluída nos métodos de análise de risco e vulnerabilidade; (iii) Para estabelecer prioridades bem fundamentadas entre as possíveis medidas adaptativas, as consequências potenciais dos eventos climáticos devem ser cuidadosamente avaliadas e metodologias apropriadas devem ser usadas ao realizar avaliações de risco e vulnerabilidade, para que os resultados equilibrem a frequência dos eventos com suas consequências em um sistema sistemático; (iv) Ao planejar e desenhar ações de adaptação, os efeitos de potenciais conflitos de objetivos devem ser cuidadosamente avaliados, a fim de evitar a implementação de medidas contraproducentes. Além disso, a possibilidade de criar sinergias com metas de mitigação do clima e outras metas ambientais deve ser investigada e explorada. Em relação às principais medidas adaptativas para o transporte ferroviário aconselham-se estabelecimento de zonas livres de árvores no corredor ferroviário (proteção contra a queda de árvores e galhos) e melhorias no sistema de drenagem contra falhas (se, por exemplo, um aterro for afetado por elevados níveis de água, isto poderá ter consequências severas para a segurança do sistema ferroviário e o tempo de recuperação poderá ser substancialmente longo).

Rowan *et al.* (2013) apresentam uma matriz de sensibilidade, uma ferramenta desenvolvida para o projeto-piloto de adaptação do Estudo da Costa do Golfo do Departamento de Transporte dos EUA. Para este estudo foram analisados os seguintes tipos de eventos extremos: ondas, ondas de calor, ventos e precipitações. Os resultados indicam, por exemplo, que os efeitos das tempestades, incluindo ventos fortes e água salgada, podem danificar seriamente os sistemas elétricos, o que impacta diretamente o sistema de transporte. Além disso, à medida que a velocidade do vento aumenta, os danos às estruturas aumentam exponencialmente, o que causaria danos aos ativos de transportes que tem prospecção vertical, tais como as sinalizações. Outra análise indica que o pavimento de estradas e trilhos de trem exibe sensibilidade a eventos extremos de calor e grandes oscilações diárias de temperatura, da mesma forma o risco de flambagem da ferrovia aumenta consideravelmente. Eventos de chuva forte podem inundar estradas, desgastar o pavimento e expor as fundações das pontes. Outro fator observado é em relação às precipitações, que agravam as fissuras existentes no pavimento. A chuva também aumenta o risco de segurança na estrada ao prejudicar a visibilidade e a mobilidade, aumentando assim, a probabilidade de aquaplanagem. Em suma, embora essa matriz não defina quais medidas de adaptação devem ser implementadas para cada caso, é um passo importante para uma compreensão mais abrangente das relações entre clima e transporte. Dessa forma, os planejadores de transporte podem usar essa matriz para rastrear ativos particularmente sensíveis e, portanto, potencialmente vulneráveis às mudanças climáticas e propor medidas adaptativas para minimizá-los.

Lu *et al.* (2014) forneceram novas perspectivas sobre o comportamento de viagens em condições de clima extremo em um país em desenvolvimento, mais especificamente quanto aos impactos de inundações em Bangladesh. Com um *design* ortogonal (que serve para eliminar redundância de armazenamento de banco de dados e ambiguidade expressiva) de três cenários de inundações, os dados foram coletados por meio de pesquisa de opinião em 14 áreas costeiras e interiores. Os resultados identificam, por exemplo, que os principais fatores que afetam significativamente na mudança de comportamento de viagem (ou seja, cancelamentos e alteração de rotas ou de destinos) são a interrupção da estrada, o isolamento por inundação e a frequência de inundação. Nesse sentido, recomenda-se que as medidas adaptativas a serem implantadas protejam a infraestrutura rodoviária e garantam rotas



acessíveis nas áreas costeiras, oferecendo ao mesmo tempo mais educação sobre a adaptação às inundações nas áreas interiores.

Dunn *et al.* (2016) levantaram a importância das redes de tráfego aéreo para a sociedade global e indicaram as melhores medidas adaptativas frente as mudanças climáticas. Essa dependência crescente exige que essas redes tenham alta resiliência, no entanto, eventos anteriores mostram que podem ser suscetíveis a riscos naturais. Para esse estudo foram levados em consideração os eventos extremos, tais como, rajadas de vento, queda de neve, fortes precipitações e temperaturas adversas. Esses eventos extremos inviabilizam a operação das aeronaves, gerando assim, atrasos e cancelamentos de voos. Com base nessas informações, avaliou duas estratégias para melhorar a resiliência das redes de tráfego aéreo e mostrar que uma estratégia de reconfiguração adaptativa é superior a uma solução de redirecionamento permanente. A primeira estratégia visa reduzir o número de rotas aéreas conectadas a um aeroporto central, buscando assim, reduzir o impacto que o fechamento desse aeroporto tem para a rede remanescente. A segunda estratégia prevê-se que as rotas aéreas sejam “adaptativamente” redirecionadas a outro aeroporto mais próximo, caso sejam constatados eventos extremos, desde que exista capacidade excedente suficiente para fazê-lo.

Bollinger *et al.* (2016) desenvolveram um modelo que explora a resiliência da infraestrutura de transmissão de energia elétrica holandesa, que impacta direta e indiretamente nos sistemas de transportes, quanto aos eventos climáticos extremos. O modelo se concentra em dois tipos de eventos (inundações e ondas de calor) e avalia dois tipos de medidas de adaptação (proteções contra inundações de subestações e gerenciamento de demanda). O modelo emprega uma abordagem baseada em rede para avaliar a resiliência da infraestrutura. Os resultados sugerem que a infraestrutura é relativamente menos vulnerável aos eventos de onda de calor do que eventos de inundações. No caso de ondas de calor, a queda máxima possível no desempenho médio do sistema é quase imperceptível. No caso de inundações, a queda máxima é superior a 20%. No entanto, no geral, esses resultados sugerem que a infraestrutura holandesa é altamente resiliente, ou seja, permanece em grande parte funcional mesmo diante de eventos altamente improváveis de grande magnitude. Além disso, as medidas de adaptação testadas, ou seja, proteções contra inundações de subestações e gerenciamento de demanda demonstram uma clara capacidade de reduzir e, em alguns casos, até mesmo eliminar a vulnerabilidade da infraestrutura a inundações e ondas de calor.

## 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Não há uma solução imediata para tornar os sistemas de transportes mais resilientes e adaptados ao clima futuro, pois medidas de adaptação geralmente estão associadas a obras civis e a redesenho das cidades, o que demanda, na maioria dos casos, médio e longo prazos, além de um planejamento integrado considerando as variáveis climáticas e os possíveis riscos para cada modo de transporte. Além disso, não é possível fazer com que os sistemas de transportes urbanos sejam totalmente adaptados, já que o custo seria muito alto frente o benefício de infraestruturas totalmente resilientes.

Todavia, é possível mitigar os impactos climáticos nos sistemas por meio de estratégias para reduzir as vulnerabilidades identificadas. Acredita-se que o esforço de conceituação, análise de projeções futuras, mapeamento de boas práticas utilizadas no mundo, seja um primeiro passo fundamental. Dessa forma, verificada a necessidade da realização de pesquisas científicas que investiguem, especialmente, os impactos e as medidas de adaptação no sistema

de transportes frente às mudanças climáticas, este artigo teve como objetivo verificar, na literatura científica, quais são os trabalhos mais relevantes sobre o assunto, bem como realizar análises sistemáticas sobre eles.

Os resultados quantitativos demonstram que este assunto ainda tem muito para ser explorado, isso porque nota-se uma expansão do tema, com ápice no número de publicações em 2016 e de citações em 2018. Mostra-se ainda que importantes periódicos como o *Transportation Research Part D* e *Transportation Research Part A* se interessam pelo assunto estudado e que os países em destaque no número de publicações são EUA e Inglaterra.

Além disso, os resultados qualitativos, focados nos estudos mais relevantes da base de dados (ou seja, aqueles com maior número de citações), demonstram que esses artigos buscam avaliar os impactos das mudanças climáticas em regiões específicas como Suécia (Lindgren *et al.*, 2009), EUA (Rowan *et al.*, 2013), Bangladesh (Lu *et al.*, 2014) e Holanda (Bollinger *et al.*, 2016). Foi possível verificar que o modo de transporte avaliado também variou de estudo para estudo, sendo um focado especificamente no transporte ferroviário (Lindgren *et al.* 2009), um no transporte aéreo (Dunn *et al.*, 2016) e os demais, diretamente ou indiretamente, no sistema de transporte em geral.

Por outro lado, as análises dos impactos dividem-se naqueles que buscam avaliar eventos extremos como ventos (Lindgren *et al.*, 2009; Rowan *et al.*, 2013; Dunn *et al.*, 2016), inundações (Lu *et al.*, 2014; Bollinger *et al.*, 2016), ondas (Rowan *et al.*, 2013), ondas de calor (Rowan *et al.*, 2013; Bollinger *et al.*, 2016), precipitações (Rowan *et al.*, 2013; Dunn *et al.*, 2016), nevascas (Dunn *et al.*, 2016) e temperaturas adversas (Dunn *et al.*, 2016).

Já em relação às medidas da adaptação são feitas considerações, por exemplo, quanto ao estabelecimento de zonas livres de árvores no corredor ferroviário em casos de ventos fortes (Lindgren *et al.*, 2009), melhorias no sistema de drenagem de ferrovias contra falhas em casos de inundações (Lindgren *et al.*, 2009), proteção da infraestrutura rodoviária e garantia de rotas acessíveis nas áreas costeiras para o caso de inundações (Lu *et al.*, 2014), redução do número de rotas aéreas conectadas a um aeroporto central e redirecionamento adaptativos de rotas para outros aeroportos em caso de eventos extremos, tais como, rajadas de vento, queda de neve, fortes precipitações e temperaturas adversas (Dunn *et al.*, 2016), proteções contra inundações de subestações e gerenciamento de demanda em caso de inundações (Bollinger *et al.*, 2016), entre outras medidas de minimização dos efeitos do clima nos transportes.

Destaca-se ainda que em todos os artigos analisam estratégias de identificação das vulnerabilidades, frente a determinado evento extremo, para ampliar a capacidade adaptativa da região de estudo, independentemente do método utilizado e do modo de transporte a ser estudado. Frente à necessidade de aprimoramento desta pesquisa destaca-se a necessidade de realização de novos estudos sobre o assunto, que apresentem resultados mais fidedignos a realidade de cada região, que possam ser aplicados nas políticas públicas e que contribuam para estratégias alternativas no planejamento do setor de transporte. O conhecimento de vulnerabilidades associadas às previsões climáticas, os possíveis impactos e medidas de adaptação poderão subsidiar a elaboração e implementação de políticas públicas para transportes, bem como a integração com políticas de desenvolvimento e ambientais.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abreu, V. H. S. (2017). Revisão Bibliográfica Sistemática Sobre o Problema de Localização de Sensores de Tráfego em Redes. In *Congresso Nacional de Pesquisa em Transportes*, ANPET.
- Abreu, V. H. S., e Ribeiro, G. M. (2019). Mapeamento de Metaheurísticas aplicadas ao Problema de Localização de Sensores em Redes. *LI Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional*, SBPO.
- Bereton, P., Kitchenham, B. A., Budgen, D. e Mohamed-Khali, M. (2007). Lessons From Applying the Systematic Literature Review Process Within the Software Engineering Domain. *The Journal of System and Software*, v. 80, p. 571-583.
- Bollinger, L. A. e Dijkema, G. P. J. (2016). Evaluating Infrastructure Resilience to Extreme Weather – The Case of the Dutch Electricity Transmission Network. *European Journal of Transport and Infrastructure Research*, v.16, n. 1, p. 214-239.
- Chen, X. (2010). The Declining Value of Subscription-based Abstracting and Indexing Services in the New Knowledge Dissemination Era. *Serials Review*, v. 36, n. 2, p. 79–85.
- Dunn, S. e Wilkinson, S. M. (2016). Increasing the Resilience of Air Traffic Networks Using a Network Graph Theory Approach. *Transportation Research Part E – Logistics and Transportation Review*, v.90, p. 39-50.
- Koetse, M. J. e P. Rietveld, (2007). *Climate Change, Adverse Weather Conditions, and Transport: a Literature Survey*. Disponível em [http://ced.berkeley.edu/faculty/ratt/readings/ClimateChange\\_Sea\\_LevelRise-references/Koetse\\_Rietveld\\_2007.pdf](http://ced.berkeley.edu/faculty/ratt/readings/ClimateChange_Sea_LevelRise-references/Koetse_Rietveld_2007.pdf).
- IPCC. (2007). Climate Change Impacts, Adaptation and Vulnerability. In: *Climate Change 2007. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report (AR-4) of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)*.
- IPCC. (2012). *Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation*. A Special Report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC),
- IPCC. (2014). *Summary for Policymakers*. Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Levy, Y. e Ellis, T. J. (2006). A Systems Approach to Conduct an Effective Literature Review in Support of Information Systems Research. *Informing Science: The International Journal of an Emerging Transdiscipline*, v. 9, p. 181–212.
- Lindgren, J., Jonsson, D. K. e Carlsson-Kanyama, A. (2009). Climate Adaptation of Railways: Lessons from Sweden. *European Journal of Transport and Infrastructure*, v.9, n. 2, p. 164-181.
- Lu, Q., Zhang, J. e Peng, Z. (2014). Inter-city Travel Behaviour Adaptation to Extreme Weather Events. *Journal of Transport Geography*, v.41, p. 148-153.
- Marengo, J. A. (2009). *Impactos de Extremos Relacionados com o Tempo e o Clima – Impactos Sociais e Econômicos*. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, Centro de Ciências do Sistema Terrestre, São Paulo, Brasil. Boletim do Grupo de Pesquisa em Mudanças Climáticas (GPMC), v. 8, p. 1-5.
- Oswald, M. R. e McNeil, S. (2013). Methodology for Integrating Adaptation to Climate Change into the Transportation Planning Process. *Public Works Management & Policy*, v. 18, n. 2, p. 145-166.
- PBMC. (2013). Contribuição do Grupo de Trabalho 2 ao Primeiro Relatório de Avaliação Nacional do Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas. Sumário Executivo do GT2. Rio de Janeiro, Brasil. 28 p. ISBN: 978-85-285-0208-4.
- Rowan, E., Evans, C. e Riley-Gilbert, M. (2013). Assessing the Sensitivity of Transportation Assets to Extreme Weather Events and Climate Change. *Transportation Research Record*, v. 2326, p. 16-23.
- Santos, A. S. e Ribeiro, S. K. (2015). The role of transport indicators to the improvement of local governance in Rio de Janeiro City: A contribution for the debate on sustainable future. *Case Studies on Transport Policy*, v. 3, n. 4, p. 415–420.
- TRL. (2011). *Resilient Mobility: Creating an Adaptive Future for Transport*. UK, Transport Research Laboratory (TRL).
- US DOT Center. (2012). *The Potential Impacts of Climate Change on Transportation*. Workshop Summary, pp. 3-28. US Department of Transport (DOT) Center for Climate Change and Environmental Forecasting, Federal Research Partnership Workshop, Summary and Discussion Papers, USA.

---

Daniela Quintaes Louvain Trindade (daniela.trindade@pet.coppe.ufrj.br)

Victor Hugo Souza de Abreu (victor@pet.coppe.ufrj.br)

Andrea Souza Santos (andrea.santos@pet.coppe.ufrj.br)

Programa de Engenharia de Transportes, Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro

Av. Horácio Macedo, 2030, 101 – Cidade Universitária – Rio de Janeiro, RJ, Brasil