

ROBUSTEZ DAS INFRAESTRUTURAS DE TRANSPORTE DE PAÍSES EMERGENTES ÀS MUDANÇAS DO CLIMA

George Vasconcelos Goes

Daniel Neves Schmitz Gonçalves

Marcio de Almeida D'Agosto

Programa de Engenharia de Transportes (PET/Coppe)
Universidade Federal do Rio de Janeiro

RESUMO

Os sistemas de transporte têm se tornado mais vulneráveis a incidentes, dado que a presença de congestionamentos tende a crescer conforme o processo de urbanização avança. Logo, torna-se mais difícil a recuperação perante incidentes, visto que a capacidade disponível para acomodar novas distribuições de fluxos é cada vez menor. Os métodos tradicionais para avaliação do risco de inundações, baseados em registros históricos, com frequência ignoram as tendências de longo prazo, tais como as decorrentes de mudanças climáticas oriundas de ações antropogênicas. O objetivo desse trabalho é avaliar a robustez de uma rede viária perante eventos extremos de inundações associados às mudanças climáticas por meio da proposição de um método. Para isso, conduziu-se uma revisão bibliográfica sistemática para identificar os estudos que relacionam transporte e robustez com eventos extremos. Os resultados mostram que é possível estabelecer um método de análise que permite a criação de um ranking de prioridades em função dos potenciais danos.

PALAVRAS-CHAVE: adaptação; mudança do clima; robustez; rede de transporte.

ABSTRACT

Transport systems have become more vulnerable to incidents as the presence of congestion tends to increase with the advance of the urbanization process worldwide. Therefore, it has been more difficult to recover from incidents, since the capacity available to accommodate more users on the road network is decreasing. The traditional methods for flood risk assessment based on historical records, frequently ignore long-term trends, such as those arising from climate change or anthropogenic actions. The present paper aims to develop a method to assess the robustness of a road network to extreme flood events. Hence, a systematic literature review is conducted to identify studies that relate transport and robustness with extreme events. Results show that it is possible to establish a priority rank, according to potential damages on the network.

KEY WORDS: adaptation; climate change; robustness; transport network.

1. INTRODUÇÃO

Os sistemas de transporte têm se tornado mais vulneráveis a incidentes, dado que a presença de congestionamentos tende a crescer conforme o processo de urbanização avança (ONU, 2014). Logo, torna-se mais difícil a estabilização do sistema após incidentes, visto que a capacidade disponível para acomodar os usuários é cada vez menor (Snelder *et al.*, 2012). Para minimizar os custos de instalação e manutenção, as infraestruturas são frequentemente dimensionadas para operar próximas às capacidades, com pequenas margens de reserva. Isso as tornam sensíveis a vários incidentes como: (1) falhas técnicas; (2) condições meteorológicas extremas; (3) ações antagônicas e outras ameaças que podem gerar impactos severos na sociedade caso um componente crítico falhe (Mattsson & Jenelius, 2015).

Desde meados de 1950, tem-se evidências de alterações na frequência de fenômenos naturais extremos. Parte das ocorrências está associada à influência humana, como inundações em algumas regiões do planeta (IPCC, 2012). Se a tendência atual de mudança do clima for mantida, mais desastres naturais tendem a ocorrer (Díaz-Delgado e Gaytán Iniestra, 2014). Desta forma, os cenários de mudança do clima indicam que a mitigação de gases de efeito estufa (GEE) não é suficiente para estabilizar a temperatura atual para o ano de 2100 (ano de referência de parte dos estudos do clima para o longo prazo). Passa-se, portanto, a dar maior atenção às medidas de adaptação, juntamente com a pesquisa e implementação de medidas de mitigação contínua (Axelsen *et al.*, 2016).

Portanto, ampliar a robustez das redes viárias em relação aos eventos extremos e mudanças do clima emerge como um dos principais objetivos do poder público (Demirel *et al.*, 2015). Trata-se da capacidade de sistemas para resistir a desastres sem degradação significativa ou perda de desempenho (Tierney and Bruneau, 2007). Com base na informação sobre a robustez, os tomadores de decisões podem avaliar adaptações na infraestrutura (ou na gestão de recursos) para diminuir as externalidades negativas na comunidade e no sistema de transportes (Knoop *et al.*, 2012). Para isso, necessita-se de procedimentos que permitam avaliar a robustez de um sistema com base em cenários distintos de severidade.

Nesse tocante, os procedimentos convencionais para a avaliação do risco de eventos extremos, baseados em registros históricos, com frequência ignoram as tendências de longo prazo, tais como as decorrentes de mudanças do clima relacionadas a ações antrópicas. A mudança aparentemente pequena na temperatura, por si só, pode não impactar significativamente as infraestruturas de transporte, no entanto, cria-se efeitos no padrão climático global na Terra, manifestado no aumento da frequência e intensidade de eventos climáticos extremos (Easterling *et al.*, 2000). Os impactos são particularmente importantes para os países em desenvolvimento, sobretudo localizados em áreas costeiras (Rattanachot *et al.*, 2015).

Em relação ao nível de desenvolvimento econômico de um país, estudos como o de Millner *et al.*, (2015) evidenciam que o trabalho de modelagem de cenários em economias desenvolvidas tem uma previsibilidade maior devido à consistência dos dados, recursos monetários e políticas públicas. Apesar disso, Rattanachot *et al.*, (2015) reforça que todas as agências de transporte no mundo podem precisar avaliar os efeitos potenciais da mudança climática em sua infraestrutura de transporte e desenvolver uma estratégia de adaptação consistente para enfrentar os desafios futuros. Para isso, o primeiro passo é identificar na literatura especializada quais as abordagens utilizadas em pesquisas anteriores relacionadas à avaliação da robustez de uma rede viária na ocorrência de um evento de inundação. Embora haja previsões para a evolução do clima global em cenários futuros (IPCC, 2014), os impactos dessas previsões não são distribuídos uniformemente e, usualmente, as pessoas que estarão expostas aos maiores impactos são as que menos conseguem lidar com o risco da mudança do clima (Adger *et al.*, 2003). Emerge, portanto, o questionamento sobre como reunir dados e modelar cenários atuais e futuros em um contexto com pouca disponibilidade de dados e consistência metodológica.

Este artigo busca avaliar a robustez de uma rede viária perante eventos extremos de inundações associados às mudanças climáticas em países emergentes. Para isso, desenvolve-se uma revisão bibliográfica sistemática (RBS) no intuito de identificar quais são as ferramentas mais utilizadas, o tipo de modelagem e o evento climático indutor da inundação.

2. RBS EM CENÁRIOS DE ADAPTAÇÃO E MUDANÇA DO CLIMA

Os preceitos da revisão sistemática seguem os trabalhos de Tranfield *et al.* (2003). Desta forma, o procedimento de análise de artigos científicos é baseado em três etapas: (1) identificação; (2) seleção; e (3) inclusão dos artigos para análise. A etapa de identificação consiste na leitura do título, resumo e palavras-chave do artigo, verificando a aderência dos temas ao objetivo desse trabalho. A etapa de seleção busca restringir a quantidade de artigos que serão lidos por completo, enquanto a atividade de inclusão trata dos artigos que serão analisados e sintetizados na revisão. O protocolo de pesquisa adota uma RBS devido a sua finalidade em desenvolver uma conceituação holística e síntese de um tópico emergente, fornecendo saídas para reinterpretar pesquisas anteriores ou evidenciar novas lacunas no conhecimento.

Para identificar os estudos que relacionam transporte e robustez com eventos extremos, foi utilizada a combinação das palavras-chave: ("*climate change adaptation*" AND "*road network*" AND ("*robustness*"), utilizando a base de dados *Science Direct*. Optou-se por essa base de dados pela vasta disponibilidade periódicos indexados da Editora Elsevier, no entanto, reconhece-se que a utilização de uma base de indexação mais ampla (p. ex. Web of Science) contribuiria com a qualidade da revisão.

A escolha das palavras-chave foi realizada com base em revisão preliminar da literatura. Considerou-se o período de publicação entre 2008 e 2018, com restrição a artigos publicados em periódicos internacionais indexados e revisados por pares. Selecionou-se os artigos, com base na leitura do resumo, sendo inserido os trabalhos que propõem procedimentos para caracterização e diagnóstico da robustez e proposição de alternativas. Quanto aos critérios de inclusão, considerou-se os artigos que utilizassem algum indicador para avaliar os componentes socioeconômicos da acessibilidade, uso/cobertura do solo e demográfico.

Portanto, foram identificados 43 artigos e selecionados 23. Após a leitura completa dos artigos, com base nos critérios estabelecidos, somente três foram inclusos. Além disso, estendeu-se a busca para as referências contidas nos artigos inclusos que têm potencial para serem inseridas nesta RBS. Ademais, passou-se a considerar teses e relatórios técnicos de instituições governamentais. Na segunda atividade de busca, foram identificados 30 artigos, sendo inclusos 10 artigos. Portanto, as duas atividades de busca resultaram em 13 artigos inclusos. A Figura 1 ilustra a quantidade de artigos por meio de publicação.

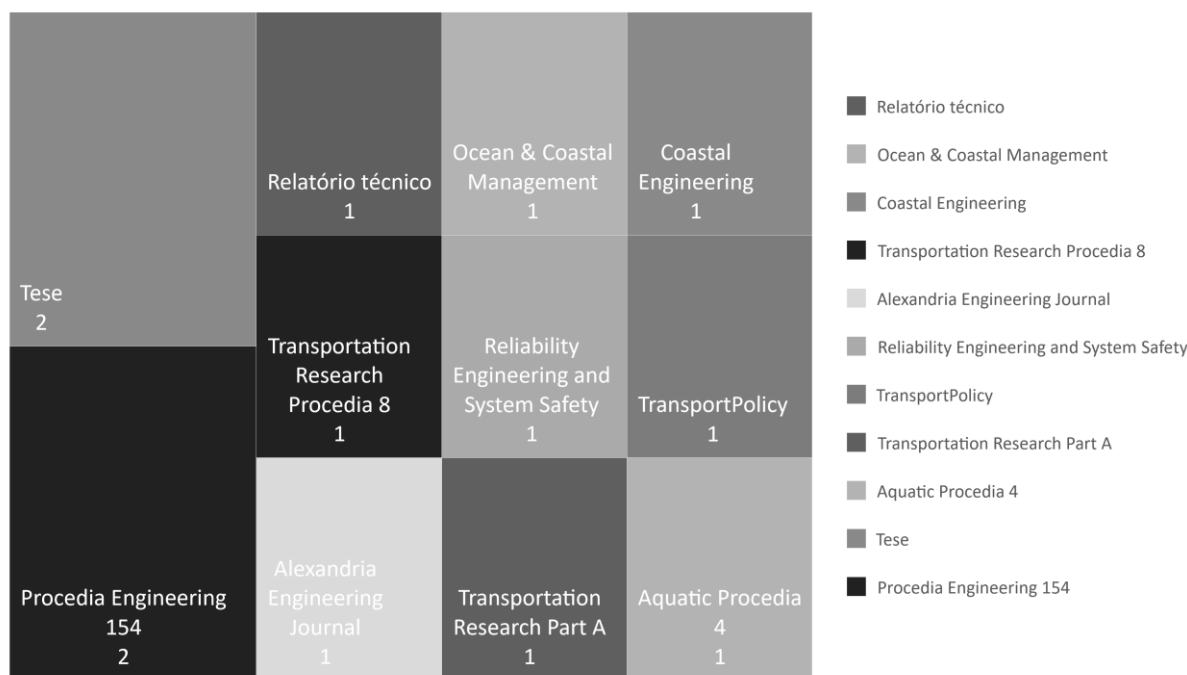


Figura 1: Distribuição dos artigos selecionados por meio de publicação.

Fonte: Autores.

Nota-se a predominância de periódicos com foco em engenharia oceânica e engenharia de transportes, o que é esperado devido ao propósito deste estudo de integrar as duas áreas do

conhecimento. Apesar da abrangência temporal ampla, 65% dos artigos foram publicados nos últimos quatro anos. No tocante à distribuição geográfica (Figura 2), destaca-se a participação de estudos publicados por países emergentes. Esse resultado é efeito do enfoque em trabalhos cujo método e saídas do modelo possam ser melhor explicados no contexto socioeconômico desses países.

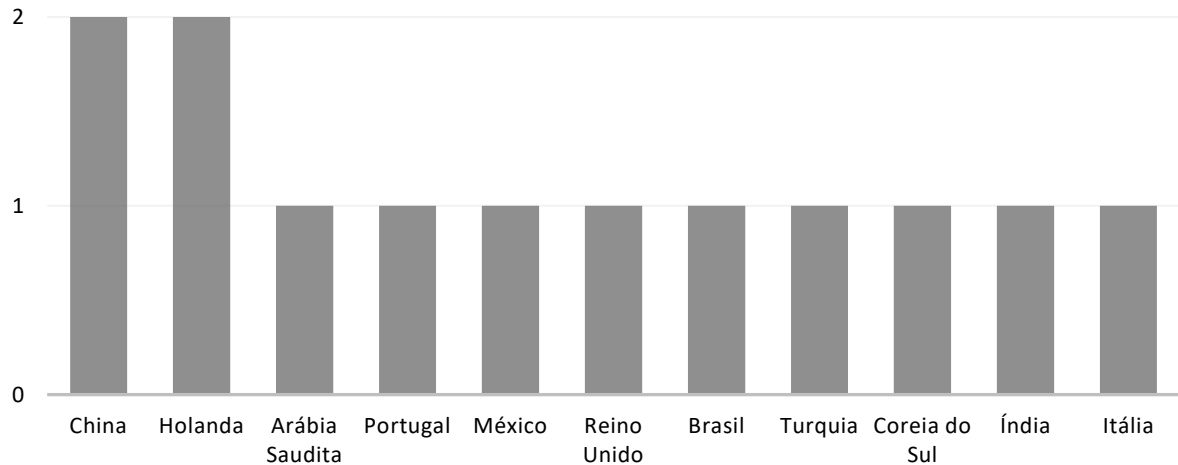


Figura 2: Distribuição geográfica dos artigos inclusos.

Fonte: Autores.

Para efeito de classificação de impactos de eventos aleatórios, o relatório técnico da Agência Europeia do Ambiente (AEA) (Ramieri e Hartley, 2011) divide os dados socioeconômicos, em três componentes: (1) uso e cobertura do solo; (2) demográfico; e (3) acessibilidade. O uso e cobertura do solo refere-se a coberturas como: vegetação, água e malha urbana. O componente demográfico é constituído por variáveis estatísticas da localidade como: quantidade de domicílios, renda, crescimento populacional etc. O terceiro componente, acessibilidade, refere-se à circulação de pessoas e bens. Por conseguinte, optou-se por considerar os elementos sugeridos pelo relatório da AEA na estratificação dos artigos da RBS, uma vez que são resultados de uma revisão sobre elementos socioeconômicos de relevância para análises de inundações e, para efeito dessa pesquisa, são pertinentes ao objeto de estudo.

Portanto, com base na revisão preliminar dos estudos, optou-se por identificar as categorias da literatura:

- Evento de inundação – verificar quais estudos aplicaram o modelo com base em chuvas ou aumento do nível do mar. Representa um grau de complexidade do modelo;
- Elemento socioeconômico analisado – verificar a abrangência da avaliação de robustez da rede de transporte;
- Modelagem – aleatoriedade das variáveis no decorrer do evento (dinâmica) ou análise estática;
- Desastre – efeitos climáticos com base em observação ou projeção de cenários com base em fatores de risco (p. ex. adoção de hipóteses);
- Ferramenta de modelagem hidrodinâmica – identificar a ferramenta para modelagem da inundação.

2.1 Discussão

Os trabalhos de Alkema (2007); Demirel *et al.* (2015); Haldar e Khosa (2015) e Birhanu *et al.*

(2016) utilizam fatores de exposição ao risco de inundação para projetar o evento extremo. A abordagem baseada somente com base em registros históricos, foi utilizada nos trabalhos de Elsafi (2014), Hong *et al.* (2015) e Rattanachot *et al.* (2015). Todavia, Villatoro *et al.* (2014) e Birhanu *et al.* (2016) recomendam que as modelagens passem a incorporar projeções futuras com base em *Representative Concentration Pathways* (RCP) dos cenários A1B do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC, 2007).

Apesar do enfoque em transporte, somente seis artigos modelaram a rede viária para avaliar o impacto dos eventos climáticos. Nesses trabalhos, o elemento de análise foi o componente da acessibilidade que, no tocante ao tráfego de veículos, mede o tempo necessário para se deslocar entre zonas de tráfego de uma localidade. Cançado (2009) mediu o impacto da obstrução dos arcos após inundação com base no modelo de simulação de tráfego INTEGRATION, enquanto que Demirel *et al.* (2015) utilizaram o módulo de transporte TRANS-TOOLS (integrado ao sistema de informação geográfica – SIG ArcGIS), considerando o modelo sequencial de demanda quatro etapas (geração, distribuição, divisão modal e alocação de viagens). Apesar de Hong *et al.* (2015) utilizarem modelagem de uma rede ferroviária em cenário de inundação, não especificaram qual ferramenta SIG foi empregada na análise.

Somente um trabalho avaliou os três componentes socioeconômicos concomitantemente (Alkema, 2007), o que indica o potencial de avaliação da robustez da rede viária não somente com base no impacto sobre a capacidade do sistema. A modelagem dinâmica foi considerada em apenas três artigos (Alkema, 2007; Bhamidipati 2014 e Demirel *et al.*, 2015), isso indica que as avaliações de robustez ainda consideram majoritariamente um cenário estático para mensurar o impacto. A utilização dos elementos socioeconômicos da Agência Europeia do Ambiente permite que o tratamento seja multissetorial. Diversos estudos foram desenvolvidos para avaliar o risco de inundações, sendo divididos entre os que avaliam o dano em unidades monetárias e os que avaliam o bem-estar da comunidade afetada (Alkema, 2007). Segundo Kook *et al.* (2002), o mais convencional é a utilização de curvas de danos de inundação (*stage-damage curves*) que relacionam a altura da lâmina d'água com a disfunção do elemento exposto à inundação.

Nessa linha, Alkema (2007) busca relacionar a profundidade da lâmina d'água da inundação com os danos causados na localidade por meio de um índice composto. O autor argumenta que a avaliação da resiliência de uma área é melhor representada por uma série de fatores: da profundidade máxima da lâmina d'água, mapa de cobertura do solo, curva de danos para cada elemento afetado da região e custos de reparação da região afetada. O índice de danos é expresso em uma escala de 0 (sem danos) a 1 (destruição completa). Do mesmo modo, Badica e Gourbesville (2016) utilizam um índice de resiliência com base nos danos da inundação (variando de 0 a 5), avaliando os impactos em relação à cinco esferas (natural, física, econômica, social e institucional). O trabalho de Winter *et al.*, 2016 avalia os danos relacionados ao uso do solo por meio de indicadores baseados nos custos da resposta emergencial e trabalhos de remediação, indo na mesma linha que Carrasco *et al.* (2012), Bhamidipati (2014) e Birhanu *et al.* (2016).

Na Figura 3, evidencia-se que 46% dos estudos analisam o atributo da acessibilidade (escopo deste trabalho), destes, somente 24% analisam os efeitos dos eventos extremos de forma dinâmica, ou seja, verificam o comportamento das variáveis ao longo de um intervalo de tempo. É importante salientar que todos os artigos da RBS que trabalham com modelagem dinâmica

projetaram os efeitos ao longo do tempo. Na outra vertente, 76% dos artigos analisaram um cenário determinístico, com variáveis estáticas. Deste, 40% analisaram estatisticamente um conjunto de dados de inundações (com base em observações históricas) ou cenários globais (p. ex. IPCC A1B). Nenhum artigo, no entanto, indicou uma variável proxy que possa ser utilizada para projetar a frequência de inundações para o futuro.

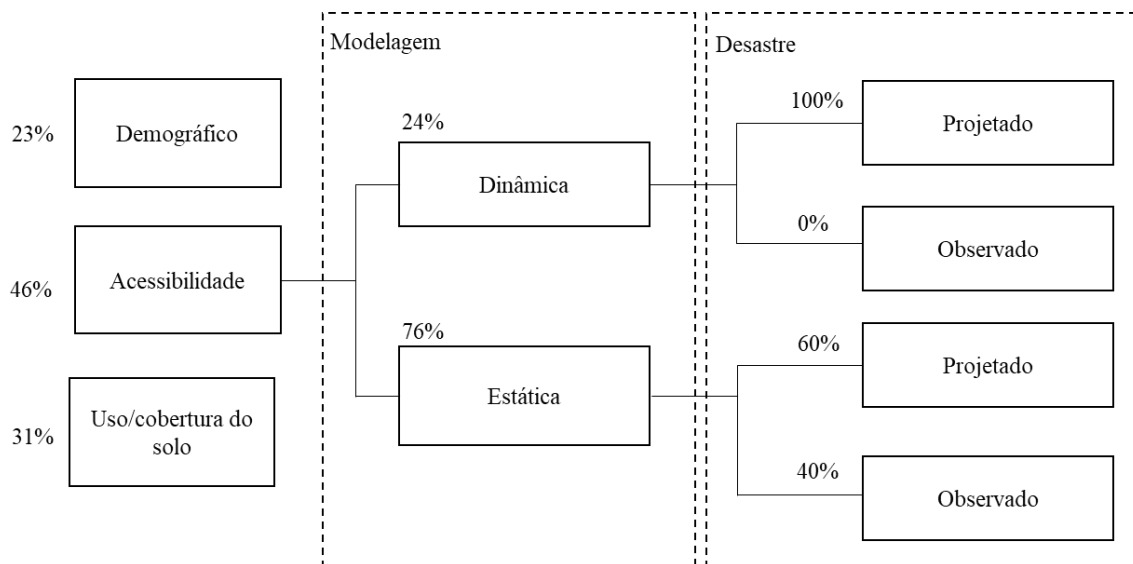


Figura 3: Distribuição dos artigos inclusos quanto ao tipo de modelagem e aferição do desastre.

Cinco dos treze artigos não utilizaram uma ferramenta para modelar a inundação. Isso significa que esses trabalhos não desenvolveram mapas de inundação, bem como não analisaram a erosão da costa para um clima futuro. Gera-se, com isso, a dificuldade em associar a análise de robustez de um sistema local com os modelos globais de mudança do clima para cenários futuros, conforme defendido por Agder *et al.*, (2003). Com base nesses dados e de uma composição de indicadores que podem ser adaptados para uma análise de robustez perante eventos climáticos extremos, selecionou-se os indicadores baseados nos elementos socioeconômicos de acessibilidade, uso/cobertura do solo e demográfico (Tabela 1).

Tabela 1: Levantamento de indicadores/índices.

Elemento socioeconômico (AEA)	Indicadores/índices	Quantidade
Acessibilidade	Altura da lâmina d'água/danos estimados; quantidade de arcos rompidos/total de chuvas nesses arcos; confiabilidade do tempo de viagem; tempo de viagem; acidentes de tráfego; custo total de transporte; duração da interrupção.	6
Uso/cobertura do solo	Diminuição das atividades (indústria, agricultura e serviços); custos com remediação da infraestrutura e instalações; custos emergenciais; índice de resiliência para inundações.	4
Demográfico	Densidade populacional da região; renda da população.	2

A Tabela 2, por conseguinte, sintetiza os artigos de pesquisas anteriores, relacionadas à análise de robustez. A Frequência indica a quantidade de citações do elemento no conjunto de trabalhos.

Tabela 2: Síntese da revisão dos artigos inclusos.

Categorias	Elementos	Alkema (2007)	Cançado (2009)	Ramieri <i>et al.</i> (2011)	Carrasco <i>et al.</i> (2012)	Villatoro <i>et al.</i> (2014)	Bhamidipati (2014)	Elsafi <i>et al.</i> (2014)	Hong <i>et al.</i> (2015)	Rattanachot <i>et al.</i> (2015)	Demirel <i>et al.</i> (2015)	Haldar e Khosa (2015)	Birhanu <i>et al.</i> (2016)	Winter <i>et al.</i> (2016)	Frequência
Evento climático	Chuvas	x	x				x	x	x			x	x	x	8
	Aumento do nível do mar			x	x	x				x	x				5
Elemento socioeconômico analisado	Acessibilidade	x	x				x		x	x	x				6
	Uso/cobertura do solo	x	x			x						x			4
	Demográfico	x	x		x	x							x	x	6
Modelagem	Dinâmica	x					x				x				3
	Estática		x	x	x	x		x	x	x		x	x	x	10
Desastre	Projetado	x	x	x	x	x	x				x	x	x		9
	Observado							x	x	x				x	4
Ferramenta de modelagem hidrodinâmica	DELFT	x		x											2
	HEC-RAS		x												1
	MIKE 21				x	x									2
	MIKE 11											x			1
	LISFLOOD										x				1
	GAMA						x								1

Fonte: Autores.

3. MÉTODO

Com base na RBS, o método desenvolvido neste trabalho é ilustrado na Figura 4. Na primeira fase (Dados e premissas), é delimitada a área de estudo e são coletados os dados que servirão de entrada para os modelos hidrodinâmico e de tráfego. As etapas metodológicas para elaboração dos mapas são divididas em dois grupos:

- Modelo hidrográfico, formada pelas etapas: Fator de ameaça e Mapa de inundação;
- Modelo viário, constituído pelas atividades: Geração de viagens; Distribuição de viagens; Divisão modal; Alocação de viagens e Mapa da rede viária íntegra.

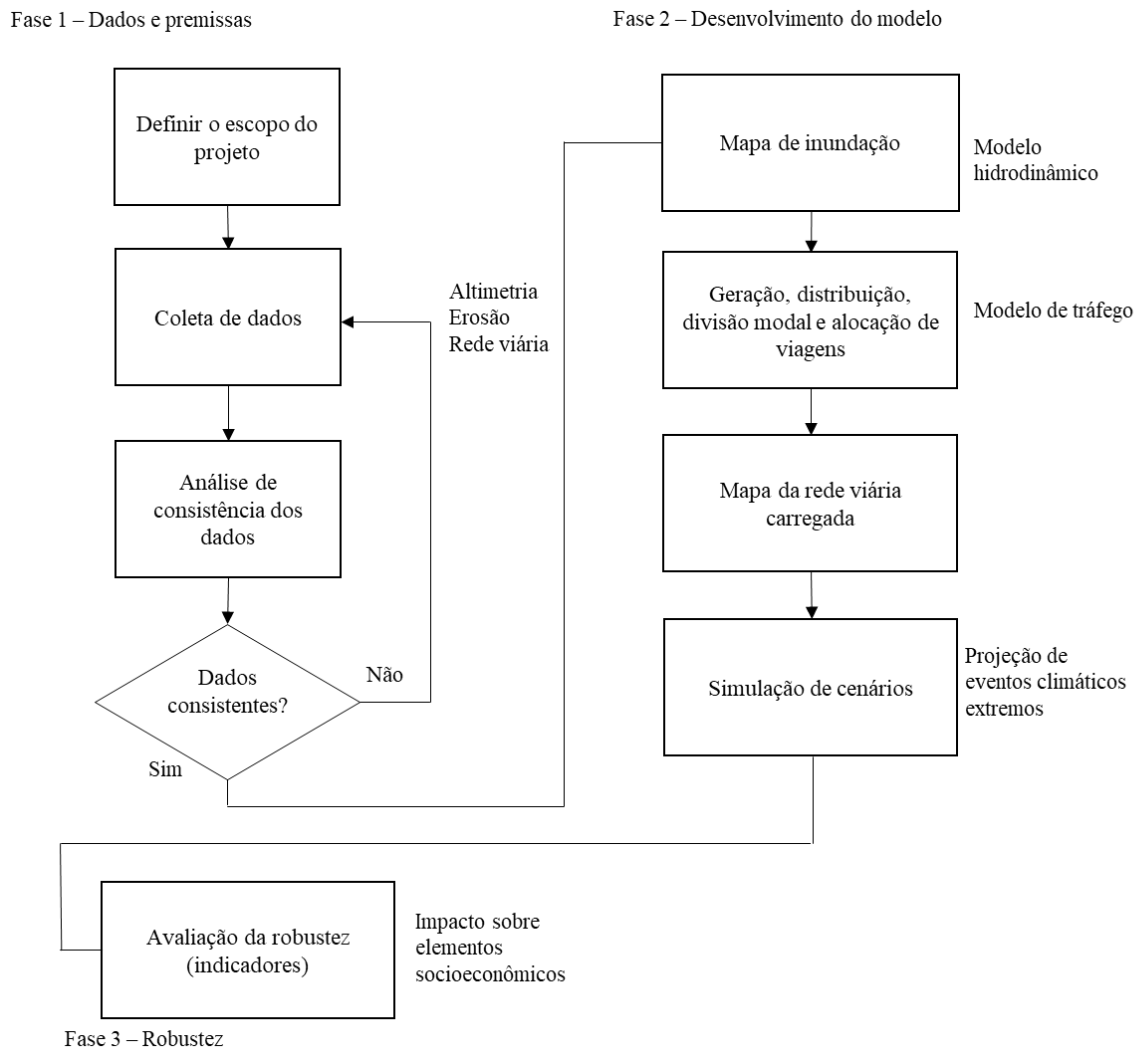


Figura 4: Método para avaliação da robustez.

Fonte: Autores.

Na etapa de coleta de dados, obtém-se os dados georreferenciados do solo e das zonas costeiras (para o modelo hidrodinâmico); dados de tráfego, como capacidade da via, volume de tráfego, velocidade regulamentada, quantidade de nós e arcos (modelo de tráfego); variável proxy que explique o comportamento do evento de inundação ao longo do tempo (obtida por ferramenta de regressão); além dos dados socioeconômicos que servirão de base para a análise de robustez da rede viária. É oportuno salientar os indicadores selecionados na RBS são uma sugestão obtidos na literatura. Entende-se que a aplicação deles está condicionada à disponibilidade de

dados da localidade de estudo, bem como à consistência deles. Nesse tocante, na etapa de análise de consistência dos dados, as informações são tabuladas e a normalidade das amostras é verificada com base no teste de Shapiro-Wilk (Bussab e Morettin, 1987). Assim, verifica-se se os dados podem ser aproximados por uma distribuição normal. Além disso, elimina-se os dados discrepantes (*outliers*) da amostra.

No modelo hidrográfico o fator de ameaça é composto pelas atividades de identificação das variáveis que afetam os níveis de inundações (para os rios/lagoas e costa marítima) e identificação da probabilidade ocorrer um evento extremo. A inferência do evento extremo é baseada em registros históricos e projeções de intensidade, sendo calibradas com o Atlas de Projeções Climáticas Global e Regional (Oldenborgh *et al.*, 2013). O Mapa de risco de inundação parte das simulações hidrológica e hidrodinâmica dos elementos locais obtidos na coleta de dados. Com base nisso, têm-se como projetar cenários futuros baseados na evolução tendencial dos eventos climáticos.

Na etapa posterior, modelagem de tráfego, o desenho dos nós e arcos é desenvolvido, por ferramenta de SIG ou por linguagem de programação, podendo seguir o procedimento sequencial de demanda quatro etapas descrito no trabalho de Souza e D'Agosto (2013). Conforme resultado obtido na RBS, utiliza-se alocação dinâmica do tráfego, visto ter melhor aderência em pesquisas com inundações de redes viárias. O propósito de utilizar tal modelo de alocação é representar o congestionamento da rede, ou seja, nenhum usuário pode melhorar o seu tempo de viagem ao alterar unilateralmente as rotas. Essa atribuição condiz com o esperado em um evento real, haja vista que caso assumisse que os usuários empregassem apenas os caminhos mínimos, concentrar-se-ia o tráfego em um pequeno número de arcos que formam as rotas mais rápidas entre pares origem-destino. Em outras palavras, a maioria dos arcos não receberia fluxo (Scott *et al.*, 2006).

A rede carregada é analisada em termos do tempo médio de viagem, estimado conforme a Equação 1, proposta pelo Bureau of Public Roads (BPR), tratada na NCHRP 365 (TRB, 1998).

$$t_a = t_{0,a} \left[1 + b \left(\frac{f_a}{cap_a} \right)^y \right] \quad (1)$$

em que

- t_a : tempo do arco a;
- $t_{0,a}$: tempo inicial do arco a;
- f_a : fluxo no arco a;
- cap_a : capacidade do arco a;
- y : constante de calibração;
- b : constante de calibração.

Na simulação de cenários, projeta-se a evolução tendencial dos eventos climáticos, utilizando a variável proxy escolhida para projetar a inundação ao longo do tempo. Por meio da confrontação do mapa de inundação com o mapa da rede viária tem-se como estimar a quantidade de arcos que irão ser obstruídos e, com base na alocação dinâmica de tráfego, pode-se observar o comportamento do fluxo de veículos ao longo da inundação, bem como os impactos nas atividades (uso e cobertura do solo) e demografia (dados sobre a população afetada).

Para a avaliação da robustez, com base nos indicadores de acessibilidade obtidos na RBS, sugere-se a adoção de um índice que meça o tempo de viagem mediante a obstrução total ou parcial de um arco da rede. Nesse tocante, o índice de robustez da rede modificado (NRI-m), desenvolvido como uma modificação do índice de robustez da rede (NRI) (Scott *et al.*, 2006), considera a redução na capacidade do arco perante evento intempestivo. Tal proposição o torna mais fidedigno aos eventos reais de falhas nos arcos.

Elaborado por Sullivan *et al.*, (2010), o NRI modificado produz resultados que são independentes do grau de conectividade de rede, ou seja, não necessita de uma vasta quantidade de nós e arcos e podem ser utilizados para avaliar as redes com arcos isolados, uma vez que ainda se consegue manter o status de rede em equilíbrio. Um arco isolado se trata de uma ligação que corta completamente uma porção da rede se for removido. Caso o corte seja completo, não há como analisar cenários de tempos de viagem para fluxos com destinos àqueles arcos isolados. Portanto, ao simular um contexto de transporte baseado no completo corte do arco equivale a sempre considerar o pior caso possível, dissociando-se dos eventos presentes na realidade do dia-a-dia.

A mudança das rotas decorrente de um evento intempestivo pode sobrecarregar links alternativos, seja da mesma zona ou de zonas mais distantes. Nesse tocante, a formulação do indicador é descrita na Equação 2.

$$NRIa = ca - c \quad (2)$$

em que $NRI-m$ = Índice de Robustez da rede para o arco a ;
 ca = custo do tempo de viagem da rede, após remoção do arco a ;
 c = custo do tempo de viagem com a rede intacta.

Desta forma, tem-se que:

$$ca = \sum_a t_a v_a \delta a \quad (3)$$

$$c = \sum_a t_a v_a \quad (4)$$

onde t_a = tempo de viagem no *link* a ;
 v_a = volume de tráfego no *link* a ;
 δa = fração da capacidade do arco (igual a 1 para arco intacto).

O método, portanto, permite a utilização de um índice composto, inserindo novas variáveis ao resultado do NRI. Para isso, depende da coleta de dados e do indicador escolhido.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O objetivo desse trabalho foi propor um método para avaliar a robustez de uma rede viária perante eventos extremos de inundações associados às mudanças climáticas. Para isso, realizou-se uma revisão sistemática acerca de modelagem hidrológica em cenários de inundações em zonas costeiras e de rios ou lagoas, no intuito de relacioná-las com diminuição da acessibilidade de uma rede viária. Evidenciou-se que as modelagens dinâmicas têm sido associadas à projeção de cenários futuros, em detrimento de uma modelagem determinística. Outra questão tem sido a ausência de estudos que simulam inundações oriundas do aumento do nível do mar, concomitantemente com inundações de rios e lagoas.

Os trabalhos identificados na RBS mostram uma tendência de simulação de inundações aderente aos cenários globais do IPCC, no entanto há ausência de indicação de uma variável proxy que possa ser utilizada para projeção da evolução do evento extremo ao longo do período

de simulação. No total, foram identificados 14 indicadores que podem ser utilizados para avaliar a robustez de uma rede viária perante um evento climático extremo: 6 para o elemento socioeconômico da acessibilidade; 4 para uso/cobertura do solo; e 2 para demografia. Salienta-se que todos os artigos que modelaram de forma dinâmica as variáveis de inundação, utilizaram esses dados para projetar os eventos para o futuro. Na outra vertente, 40% dos que utilizaram modelagem determinística, optaram por utilizar registros históricos em um cenário pontual.

Por fim, este estudo estabelece um método de análise que, se empregado em localidades, permite a criação de um “ranking” de prioridades em função dos potenciais danos. Considera-se o tripé da modelagem de ventos de inundações encontrados na RBS: (i) elaboração de mapa da inundação; (ii) elaboração de mapa da localidade (com a possibilidade de inserir a rede viária, cobertura do solo e sistema de atividades); e (iii) confrontação dos mapas para aferição dos danos, utilizando os indicadores selecionados na revisão sistemática.

Como limitação, tem-se a reduzida quantidade de artigos inclusos na RBS. Sugere-se a ampliação da busca para outras bases de indexação (p. ex. SCOPUS ou Web of Science). Ademais, sugere-se uma revisão complementar para a identificação de um índice composto que avalie tanto o desempenho da rede viária como os demais indicadores socioeconômicos selecionados.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Adger, W. N., Huq, S., Brown, K., Conway, D., & Hulme, M. (2003). Adaptation to climate change in the developing world. *Progress in development studies*, 3(3), 179-195.
- Alkema, D. (2007) Simulating floods: on the application of a 2D-hydraulic model for flood hazard and risk assessment. *PhD Thesis*, 209. Obtido de <http://igitur-archive.library.uu.nl/dissertations/2007-1010-202923/UUindex.html>
- Axelsen, C., Grauert, M., Liljegren, E., Bowe, M., & Sladek, B. (2016). Implementing climate change adaptation for European road administrations. *Transportation Research Procedia*, 14, 51-57.
- Birhanu, D., Kim, H., Jang, C., e Park, S. (2016) Flood Risk and Vulnerability of Addis Ababa City Due to Climate Change and Urbanization. *Procedia Engineering*, 154, 696–702. doi:10.1016/j.proeng.2016.07.571
- Cançado, V. L. (2009) Consequências econômicas das inundações e vulnerabilidade: Desenvolvimento de metodologia para avaliação do impacto nos domicílios e na cidade., 394.
- Carrasco, A. R., Ferreira, Ó., Matias, A., e Freire, P. (2012) Flood hazard assessment and management of fetch-limited coastal environments. *Ocean and Coastal Management*, 65, 15–25. doi:10.1016/j.ocecoaman.2012.04.016
- Claudio A. G. Egler, Paulo P. de Gusmão. Megacidades, Vulnerabilidades e Mudanças Climáticas: Região Metropolitana do Rio de Janeiro.
- Demirel, H., Kompil, M., e Nemry, F. (2015) A framework to analyze the vulnerability of European road networks due to Sea-Level Rise (SLR) and sea storm surges. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 81, 62–76. doi:10.1016/j.tra.2015.05.002
- Díaz-Delgado, C., e Gaytán Iniestra, J. (2014) Flood risk assessment in humanitarian logistics process design. *Journal of Applied Research and Technology*, 12(5), 976–984. doi:10.1016/S1665-6423(14)70604-2
- Easterling, D.R., Meehl, G.A., Parmesan, C., Changnon, S.A., Karl, T.R., Mearns, L.O., 2000. Climate extremes: observations, modeling, and impacts. *Science* 289, 2068
- Elsafi, S. H. (2014) Artificial Neural Networks (ANNs) for flood forecasting at Dongola Station in the River Nile, Sudan. *Alexandria Engineering Journal*, 53, 655–662. doi:10.1016/j.aej.2014.06.010
- Haldar, R., e Khosa, R. (2015) Flood Level Mitigation Study Using 1-D Hydrodynamic Modeling. *Aquatic Procedia*, 4(Icwrcoe), 925–932. doi:10.1016/j.aqpro.2015.02.116
- Hong, L., Ouyang, M., Peeta, S., He, X., e Yan, Y. (2015) Vulnerability assessment and mitigation for the Chinese railway system under floods. *Reliability Engineering and System Safety*, 137, 58–68. doi:10.1016/j.ress.2014.12.013
- 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 [C. B. Field, V. Barros, T. F. Stocker, D. Qin, D. J. Dokken, K. L. Ebi, M. D. Mastrandrea, K. J. Mach, G.-K.

- Plattner, S. K. Allen, M. Tignor and P. M. Midgley (eds.]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom, and New York, NY, USA, 582 pp.
- IPCC (2013). Annex I: Atlas of Global and Regional Climate Projections [van Oldenborgh, G.J., M. Collins, J. Arblaster, J.H. Christensen, J. Marotzke, S.B. Power, M. Rummukainen and T. Zhou (eds.)]. In: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Knoop, V. L., Snelder, M., van Zuylen, H. J., e Hoogendoorn, S. P. (2012) Link-level vulnerability indicators for real-world networks. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 46(5), 843–854. doi:10.1016/j.tra.2012.02.004
- Millner, Antony and Dietz, Simon (2015) Adaptation to climate change and economic growth in developing countries. *Environment and Development Economics*, 20 (3). pp. 380-406. ISSN 1355-770X
- Ramieri, E., e Hartley, A. (2011) Methods for assessing coastal vulnerability to climate change. ... *on Climate Change ...*, 1–93. doi:10.13140/RG.2.1.1906.9840
- Scott, D. M., Novak, D. C., Aultman-Hall, L., e Guo, F. (2006) Network Robustness Index: A new method for identifying critical links and evaluating the performance of transportation networks. *Journal of Transport Geography*, 14(3), 215–227. doi:10.1016/j.jtrangeo.2005.10.003
- Souza, C. D. R. de, e D'Agosto, M. de A. (2013) Modelo 4 etapas aplicado ao planejamento de transporte de carga. *Journal of Transport Literature*, 7, 207–234.
- Sullivan, J. L., Novak, D. C., Aultman-Hall, L., e Scott, D. M. (2010) Identifying critical road segments and measuring system-wide robustness in transportation networks with isolating links: A link-based capacity-reduction approach. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 44(5), 323–336. doi:10.1016/j.tra.2010.02.003
- Tierney, K. and Bruneau, M. (2007). "Conceptualizing and Measuring Resilience: A key to disaster loss reduction." TR News, May-June 2007, 14-18.
TRB. Transportation Research Board – NCHR Report 365 – Travel Estimation Techniques for Urban Planning, 1998.
- Tranfield, D., Denyer, D. & Smart, P. (2003). Towards a methodology for developing evidence-informed management knowledge by means of systematic review. *British Journal of Management*, 14, 207-222.
- ONU. (2013). ONU: mais de 70 da população mundial viverá em cidades até 2050. Disponível em: <http://www.onu.org.br/onu-mais-de-70-da-populacao-mundial-vivera-em-cidades-ate-2050/>. Acesso em 08 de Outubro de 2015.
- Villatoro, M., Silva, R., Méndez, F. J., Zanuttigh, B., Pan, S., Trifonova, E., Losada, I. J., Izaguirre, C., Simmonds, D., Reeve, D. E., Mendoza, E., Martinelli, L., Formentin, S. M., Galiatsatou, P., e Eftimova, P. (2014) An approach to assess flooding and erosion risk for open beaches in a changing climate. *Coastal Engineering*, 87, 50–76. doi:10.1016/j.coastaleng.2013.11.009
- Winter, M. G., Shearer, B., Palmer, D., Peeling, D., Harmer, C., e Sharpe, J. (2016) The Economic Impact of Landslides and Floods on the Road Network. *Procedia Engineering*, 143(Ictg), 1425–1434. doi:10.1016/j.proeng.2016.06.168

George Vasconcelos Goes (ggoes@pet.coppe.ufrj.br)

Daniel Neves Schmitz Gonçalves (danielnsg@pet.coppe.ufrj.br)

Marcio de Almeida D'Agosto (dagosto@pet.coppe.ufrj.br)

Departamento de Engenharia de Transportes, Universidade Federal do Rio de Janeiro/ Coppe

Centro de Tecnologia - Av. Horácio Macedo, 2030 - 101 - Cidade Universitária, Rio de Janeiro - RJ, 21941-450