IMPACTO DOS EFEITOS CLIMÁTICOS NA AVALIAÇÃO DE RISCO MULTIDIMENSIONAL DE INUNDAÇÕES EM UMA CIDADE BRASILEIRA

Lucas Borges Leal da Silva[1a], Marcelo Hazin Alencar[2a], Adiel Teixeira de Almeida[3b]
[a]Grupo de Pesquisa em Análise de Risco e Modelagem em Meio-ambiente, Ativos, Segurança, Operações e Natureza – REASON
[b]Centro de Desenvolvimento em Sistemas de Informação e Decisão – CDSID
[a,b]Universidade Federal de Pernambuco, Cx. Postal 7462, 50.630-970, Recife – Pernambuco – Brasil
[1] borgesleal.lucas@gmail.com
[2] marcelohazin@gmail.com
[3] almeida@cdsid.org.br

RESUMO

As tendências climáticas apontam que eventos extremos ocorrerão em maior frequência e intensidade, com destaque às inundações. Desse modo, é desafio dos gestores públicos promover melhorias na avaliação de risco para que o processo decisório mitigue os impactos deste desastre, como danos econômicos, desabrigados e fatalidades. Isso envolve objetivos estratégicos que frequentemente conflitam entre si. Nesse contexto, este trabalho propõe um modelo multidimensional para priorização de risco de inundação numa cidade brasileira. O modelo considera três critérios de avaliação: humano, social e financeiro, cuja agregação integra MAUT e Análise da Decisão. Além disso, ferramentas gráficas e de georreferenciamento auxiliam o processo. Os efeitos climáticos são estimados por modelos climáticos regionalizados para o local de estudo. Dois cenários de emissão de gases poluentes entre 2021-2050 guiam os resultados obtidos e ressaltam os benefícios do modelo em considerar múltiplos impactos futuros do desastre, de modo a melhorar sua gestão de risco.
PALAVRAS CHAVE. Risco de Inundações. Mudanças Climáticas. MAUT.
Tópicos. ADM – Apoio à Decisão Multicritério.

ABSTRACT

Trends in research on global climate change indicate that extreme events will occur with greater frequency and intensity, in which floods are the most common. For that reason, public managers must improve risk assessment practices so that decision-making mitigates the impacts of this disaster, which includes economic damage, homelessness and fatalities. This involves strategic objectives that often conflict with each other. In this context, this paper proposes a multidimensional model for prioritizing flood risk in a Brazilian town. The model considers three evaluation criteria: human, social and financial, whose aggregation uses MAUT and Decision Analysis. Also, graphical and georeferencing tools assist the process. Climatic effects are estimated by regionalized climate models for the study site. Two pollutant gas emission levels between 2021-2050 guide the results and they emphasize the benefits of the model in considering multiple future impacts of the disaster, in order to improve flood risk management.
KEYWORDS. Flood risk. Climate Changes. MAUT.
Paper topics. ADM- Multicriteria decision aid.

Galoá { Este trabalho foi publicado utilizando o **Galoá** proceedings

1. Introdução

A nova dinâmica dos espaços urbanos no tempo pós-moderno impõe uma preocupação contínua com processos de tomada de decisão. De fato, os gestores públicos precisam acompanhar o ritmo dessas transformações para garantir ao máximo o funcionamento urbano sustentável, pois elas são suscetíveis a eventos indesejados que muitas vezes são inevitáveis.

Especialmente quando essas decisões envolvem gerenciamento de riscos, o que deve ser destacado é o esforço das autoridades na mitigação de possíveis danos causados por desastres naturais. Uma vez que eventos extremos estão se tornando mais frequentes e severos, são as inundações aqueles que mais impactam no funcionamento urbano. Ademais, o risco de inundação é mais intenso em relação à variação espacial e temporal das condições climáticas, sendo agravado pelo crescimento populacional e rápida urbanização [Hettiarachchi, Wasko e Sharma 2019; Priori, Alencar e de Almeida 2017].

De acordo com o Escritório das Nações Unidas para Redução de Riscos de Desastres, as inundações foram o risco natural mais frequente no mundo nas últimas duas décadas, resultando em quase 150 mil mortes, mais de 8 milhões de deslocamentos e perdas econômicas na ordem de US$ 656 bilhões. Dessa forma, múltiplos impactos são sentidos, com destaque para fatalidades, enfermidades endêmico-epidêmicas, falta de moradia, desemprego, perdas de infraestrutura e também danos a ativos econômicos [Douglas et al. 2008].

Nesse contexto, para reduzir as consequências de enchentes extremas devido às mudanças climáticas, políticas e estratégias de gerenciamento de risco devem ser aprimoradas, pois a gestão preventiva em longo prazo é um fator chave no aumento da resiliência urbana às inundações [Morrison, Noble e Westbrook 2019]. No entanto, decisões em gestão de risco são complexas, incertas e requerem a participação de várias partes interessadas que têm diferentes pontos de vista e objetivos concorrentes [Kenyon 2007].

Diferentes abordagens ajudam entidades públicas e privadas a estimarem e tratarem os riscos de maneira razoável, como análise hidrometeorológica, de custo-benefício, e da decisão [Da Silva et al. 2019]. Porém, instituições e agências reguladoras tratam os riscos de forma recorrente em um ambiente de múltiplos objetivos, valores e atores múltiplos [Aven 2019], por vezes conflitantes entre si. Por esta razão a abordagem multicritério é usada em vários contextos de gerenciamento de riscos, especialmente em riscos naturais [De Almeida et al. 2015, 2016].

Sendo assim, o presente trabalho propõe uma modelagem multidimensional [Da Silva et al. 2020] para gestão preventiva de risco de inundações em áreas urbanas devido ao efeito das mudanças climáticas em uma cidade do nordeste brasileiro. Para tanto, o modelo multicritério possui uma abordagem probabilística de modo que considera a incerteza associada ao processo decisório. Três critérios de avaliação são adotados para mensuração dos impactos do evento extremo: humano, social e financeiro, cujo algoritmo de agregação do risco integra a Teoria de Utilidade Multiatributo (MAUT) e elementos de Análise da Decisão.

Ferramentas de visualização gráfica e de georreferenciamento auxiliam o gestor na tomada de decisão. Os efeitos climáticos são estimados por modelos climáticos globais regionalizados para o local de estudo, no qual dois cenários de emissão de gases poluentes [IPCC 2013] no horizonte de 2021-2050 são considerados para fundamentar os resultados ao decisor.

Este trabalho foi estruturado em seis seções: a seção 2 sumariza impactos, desafios e tendências na gestão urbana de riscos de enchentes devido aos efeitos climáticos. A seção 3 apresenta como as previsões climáticas são consideradas para avaliação de risco pelo modelo multidimensional proposto [Da Silva et al. 2020]. Um estudo de caso é apresentado e cujos resultados são posteriormente discutidos nas seções 4 e 5, respectivamente. Por fim, a seção 6 pontua os principais benefícios aos gestores com a aplicação do modelo sujeito às mudanças climáticas, além de apontar algumas questões abertas e direcionamentos para trabalhos futuros.

Galoá { Este trabalho foi publicado utilizando o **Galoá** proceedings

2. Gestão de risco de inundações e os efeitos climáticos: desafios e tendências

2.1. Impactos do evento extremo na dinâmica urbana

Primeiramente, é importante analisar como a geopolítica internacional na pós-modernidade contribui para aumentar a vulnerabilidade das áreas urbanas a desastres naturais, como enchentes e deslizamentos de terra. O fenômeno migratório e a intensa urbanização afetam as complexas inter-relações entre os setores produtivos e os mercados consumidores.

Nesse contexto, Da Silva et al. [2019] apontaram que isso gerou uma dependência da sociedade em explorar os recursos naturais, o que levou a um enorme impacto adverso no meio ambiente e, portanto, contribuiu para a aceleração das mudanças climáticas e eventos extremos.

Por esta razão é ainda mais comum que os gestores públicos estruturem processos de decisão de maneira conjunta e colaborativa, a fim de implementar ações eficientes que busquem mitigar inundações e ter controles de prevenção e minimização de danos. Múltiplos impactos adversos nos seres humanos têm sido amplamente estudados ao longo dos anos, como pode ser exemplificado na tabela a seguir.

Tabela 1 – Resumo de principais impactos causados pelas inundações em áreas urbanas

Referência	**Impactos e descrição**
[Jonkman et al. 2009]	Fatalidades. Os autores evidenciaram uma relação empírica entre a mortalidade e as características das enchentes.
[Alderman, Turner e Tong, 2012]	Em Saúde Pública. Eles apontaram evidências epidemiológicas de surtos decorrentes de inundações, como epidemias, doenças pós-traumáticas (mentais e físicas).
[Priori, Alencar e de Almeida, 2017]	Em infraestrutura. Os autores analisaram como enchentes intensas podem minar a principal infraestrutura crítica dos centros urbanos, como fornecimento de energia, logística, transporte, comunicações, drenagem etc.
[Heo e Heo, 2019]	Socioeconômico. Eles discutiram sobre os danos econômicos e financeiros aos bens públicos e privados, o impacto disso na provisão de serviços públicos e impactos futuros de eventos extremos no comércio e emprego locais como um todo.

A tabela 1 sumariza algumas das mais variadas formas de danos causados por inundações na área urbana, cuja gestão urbana de risco de inundação, quando projetada, orienta as melhores práticas para reduzir tais impactos e isso está tornando essas cidades alertas aos desafios climáticos previstos para as próximas décadas.

2.2. Influência de efeitos climáticos para avaliação de risco

Os efeitos das mudanças climáticas exigem das sociedades uma ampla agenda integrada entre instituições técnico-científicas públicas e privadas com objetivo de promover soluções preventivas, eficientes e inovadoras em face da ocorrência de inundações intensas.

Dessa forma, o gerenciamento de riscos abrange procedimentos para a elaboração de estimativas quantitativas e/ou qualitativas, a fim de que os resultados incluam não apenas a probabilidade de ocorrência de eventos perigosos, mas também suas consequências. Esses conceitos estão intimamente relacionados à relação entre a alta adaptabilidade das cidades e dos governos, que podem se valer de valiosa experiência na tomada de decisões multidimensionais [Hoegh-Guldberg et al. 2018].

Por isso os avanços recentes na área sugerem a abordagem multicritério para auxiliar este processo de decisão. Daí é essencial que os fundamentos científicos que gerem o risco do evento extremo sejam muito robustos e atualizados. Isso se aplica não apenas considerar a velocidade e extensão das mudanças climáticas, mas também a avaliar seus impactos bem como em selecionar ações necessárias para mitigá-las. Ademais, é importante ressaltar que o comportamento da precipitação não é padronizado nem pode ser controlado pela ação humana, ou seja, a incerteza é inerente a este ambiente de decisão e requer a aplicação de metodologia adequada para tal.

Galoá { Este trabalho foi publicado utilizando o **Galoá** proceedings

3. Processo decisório na gestão de risco multidimensional de inundação

Dada a motivação exposta anteriormente, esta seção apresenta um novo modelo proposto por [Da Silva et al. 2020] para priorização de risco de inundação, usando uma abordagem multicritério para quantificar os riscos de enchentes sob incerteza.

Posteriormente, este trabalho estrutura uma metodologia para inserção dos efeitos climáticos futuros no modelo apresentado, segundo projeções de níveis de emissão de gases poluentes. Dessa forma, essa nova perspectiva permite ao gestor adotar medidas estratégicas e mitigadoras em longo prazo. A figura 1 esquematiza a simulação climática e sua interação com o modelo proposto.

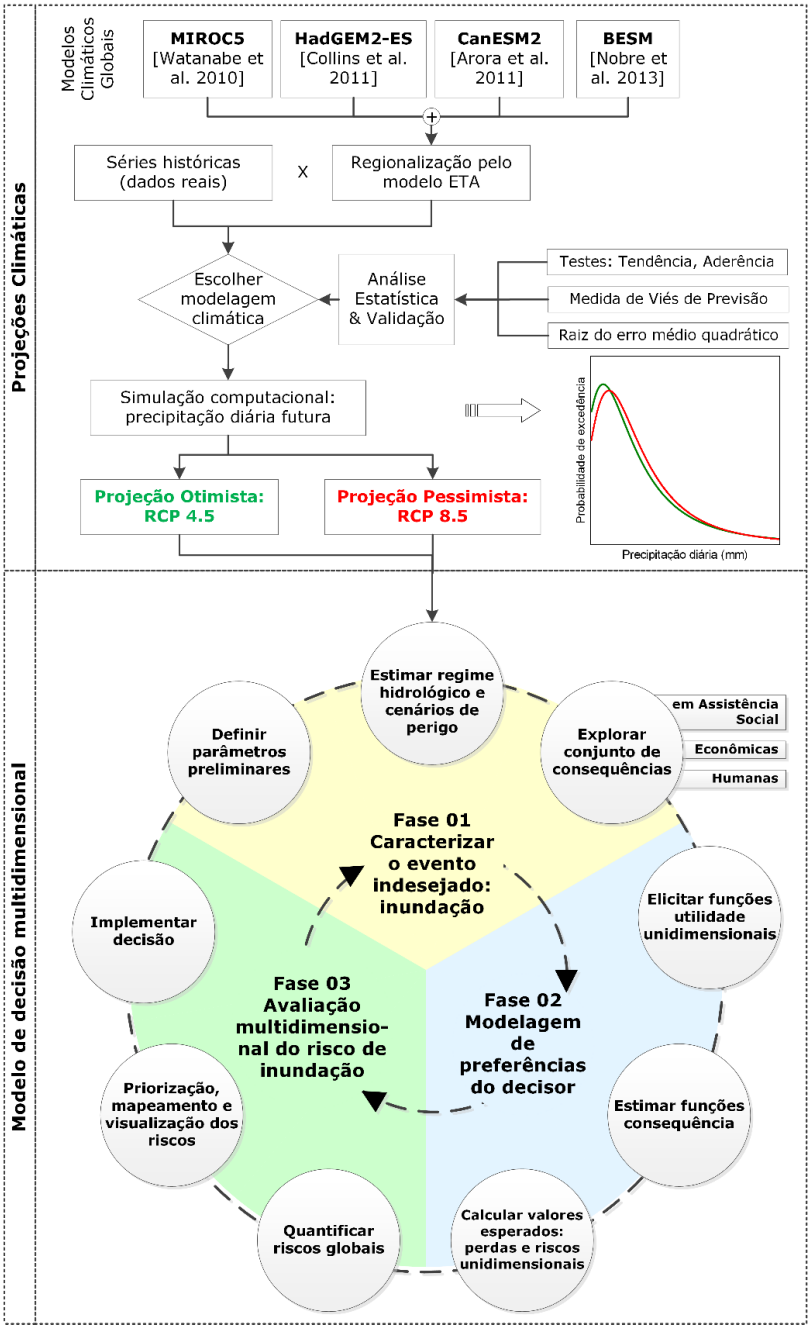


Figura 1 – Esquema do modelo de decisão para priorização de risco de inundações devido às mudanças climáticas

3.1. Proposta para modelagem de projeções climáticas na tomada de decisão

Estudos recentes emitidos no quinto relatório de avaliação do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas [IPCC 2013] apontam evidências significativas na alteração dos padrões futuros de temperatura e precipitação em todo o planeta.

Nesse sentido, este trabalho busca quantificar as mudanças futuras de padrão hidrológico na avaliação de risco de enchentes. O modelo proposto (detalhado na seção 3.2) ajusta o regime de precipitação a uma distribuição Generalizada de Valor Extremo (GEV), abordagem comumente utilizada para caracterizar o comportamento hidrológico (equação 1).

$$p(l) = \begin{cases} \frac{1}{\sigma} exp\ (-(1+kz)^{-\frac{1}{k}})(1+kz)^{-1-\frac{1}{k}}, if\ k \neq 0 \\ \frac{1}{\sigma} exp(-z-exp(-z))\,, if\ \ k = 0 \end{cases}, \quad (1)$$

onde $z \equiv \frac{l-\mu}{\sigma}$; l é a lâmina d'água; k, σ e μ são os fatores de forma, escala e localização, respectivamente.

Dessa forma, o comportamento futuro dos níveis de severidade de uma enchente é ajustado no modelo pela equação anterior e com auxílio de modelos climáticos globais extensivamente discutidos na literatura. Entretanto, por limitações computacionais, estes podem não ser capazes de predizer fenômenos atmosféricos em escalas menores ou locais. Por este motivo, este trabalho utiliza modelos climáticos com técnicas de regionalização (*downscaling* dinâmico) no qual os resultados globais são aprimorados para estudos de mitigação e adaptação.

Abaixo, são estabelecidos três passos para modelagem das projeções climáticas futuras no modelo de decisão apresentado na seção 3.1, a saber:

- Passo 1: Análise preliminar de modelos climáticos viáveis

Inicialmente, quatro modelos climáticos globais regionalizados, gerados pelo CPTEC/INPE e disponibilizados na plataforma PROJETA [INPE 2020] são considerados neste estudo: MIROC5 [Watanabe et al. 2010], HadGEM2-ES [Collins et al. 2011], CanESM2 [Arora et al. 2011] e BESM [Nobre et al. 2013]. Todos os modelos apresentam correções de vieses para aumentar a confiabilidade das previsões.

- Passo 2: Escolha e validação de modelo climático mais adequado

Trata-se da triagem, verificação e estabelecimento de parâmetros balizadores para o decisor quanto à escolha do modelo cujo regime de precipitação simulado que, quando comparado aos dados reais, mais se aproximou da realidade. Isso é apoiado por:

a) Testes estatísticos – de tendência (Mann-Kendall) e de aderência (Kolmogorov-Smirnov), são usados para a triagem dos modelos climáticos cuja tendência climática se confirma, bem como o ajuste à equação 3 é estatisticamente significante.

b) Medidas de desempenho e adequação da previsão: alguns índices presentes na literatura buscam medir a qualidade da previsão quando comparada à série histórica atual, como a Medida de Viés de Previsão (MVP) e a Raiz do Erro Médio Quadrático (REMQ). Juntas, elas indicam, respectivamente, o comportamento médio do viés obtido com a simulação, bem como a qualidade do desempenho geral das modelagens climáticas.

Quando comparados, o decisor é capaz de escolher por estes índices o melhor modelo climático viável para a região em estudo.

- Passo 3: Simulação computacional para previsão de precipitação futura

O modelo climático escolhido no passo anterior é simulado computacionalmente de acordo com o horizonte de tempo desejado, considerando duas projeções de emissão de gases de efeito estufa – GEE (*Representative Concentration Pathways*):

a) Projeção Otimista ou RCP 4.5 – indica uma estabilização em 4,5 W/m² antes do final do século XXI;

b) Projeção Pessimista ou RCP 8.5 – apresenta estabilização de 12 W/m² após o final do século, atingindo a forçante radiativa de 8,5 W/m² em 2100.

Galoá { Este trabalho foi publicado utilizando o **Galoá** proceedings

Por fim, os resultados das projeções, em termos de precipitação diária, são ajustados à equação 1 para avaliar o impacto climático futuro na priorização de risco multidimensional de inundação.

3.2. Sobre o modelo proposto [Da Silva et al. 2020]

O modelo é sequenciado em três fases principais para apoiar o decisor a construir o problema de decisão adequadamente, com auxílio de analistas e especialistas. Além disso, desde que os pressupostos sejam atendidos, este modelo pode ser aplicado em qualquer área urbana do mundo.

3.2.1 Fase 1: Caracterizar o evento indesejado

Nesta fase, o decisor estrutura o problema de decisão para entender de maneira integrada como as demandas multifacetadas podem mitigar os efeitos das enchentes em uma área urbana. Três objetivos gerais são razoavelmente estabelecidos para o problema, que serão modelados como critérios. Aqui, o decisor visa minimizar danos futuros. A tabela 2 resume os critérios considerados neste trabalho. Isso significa explorar o conjunto $\boldsymbol{X}$ de recompensas (isto é, as consequências das inundações, x). A tabela 2 apresenta os critérios considerados, a serem modelados como funções probabilísticas.

Tabela 2 – Critérios considerados pelo modelo proposto

Critério	**Descrição**	**Mensuração de x**
Econômico	Impacto financeiros decorrentes de danos patrimoniais (públicos ou privados), desemprego e prejuízos aos setores industrial, de comércio e de serviços podem ser sentidos pela ocorrência de uma inundação.	Unidade monetária
Humano	A intensidade da inundação pode se tornar fatal à população mais vulnerável, seja pela deflagração de acidentes diretos ou indiretos ao evento.	Número de vítimas fatais
Social	Entre a população afetada, estão aqueles cujos danos implicam a atuação do Estado para fornecer alguma assistência social emergencial para as famílias.	Número de vítimas desabrigadas

Na prática, o problema surge em uma área que será dividida geograficamente em zonas urbanas, modelada aqui como alternativas, a_i no conjunto $\boldsymbol{A}$. A avaliação de risco considera um fator não controlado: a profundidade da água da enchente, assumida como um estado da natureza, θ, de modo que diferentes níveis de severidade enchentes representam três cenários de risco:

- θ_1, estágio de prevenção e monitoramento: as inundações são leves a moderadas e os danos são perceptíveis, mas toleráveis de alguma forma.
- θ_2, estágio de alerta: fortes chuvas causam enchentes intensas que resultam em danos consideráveis. Isso alerta as autoridades para acionar um plano de emergência local.
- θ_3, estágio de crise: os danos são generalizados porque as inundações são extremas, o que permite aos gestores públicos decretar um estado de calamidade pública.

As probabilidades de cada cenário que ocorre, denotadas por $\pi(\theta_i)$, são chamadas probabilidades a priori. Com isso em mente, o decisor é capaz de extrair suas preferências para incorporá-lo à análise probabilística na fase seguinte.

3.2.2 Fase 2: Modelagem de preferências do decisor

Nesse estágio, o decisor expressa suas preferências para criar uma função de utilidade $u(x)$. Keeney e Raiffa [1976] estabelecem um procedimento para obtê-la. Para cada critério, o decisor estima sob uma perspectiva de perda o comportamento estocástico do conjunto de consequências $\boldsymbol{X}$, cuja função de perda, $L_\theta(a_i)$, significa os valores de utilidade esperados para uma alternativa a_i em um dado cenário θ_i usando as funções de consequência, $P(x|\,\theta, a_i\,)$. Daí, o risco unidimensional para cada alternativa no conjunto $\boldsymbol{A}$, como mostrado na equação 2, significa o valor esperado de perda de a_i.

$$r(a_i) = E[L_\theta(a_i)] = \sum_\theta \pi(\theta) L_\theta(a_i) = -\sum_\theta \pi(\theta) \int_x P(x|\,\theta, a_i\,) u(x) dx \quad (2)$$

3.1.3 Fase 3: Avaliação multidimensional do risco de inundação

Por fim, essa fase busca agregar os riscos unidimensionais em um global e é calculado conforme mostrado na equação 3.

$$r_{global}(a_i) = K_{social}\, r_{social}(a_i) + K_{humano}\, r_{humano}(a_i) + K_{economico}\, r_{economico}(a_i) \quad (3)$$

Para isso, deve-se notar que, para cada dimensão, uma constante de escala deve ser calculada de acordo com o protocolo estruturado por Keeney e Raiffa [1976]: as trocas entre as loterias conduzem o DM para inserir suas preferências no modelo matemático. É válido ressaltar as premissas de independência preferencial para a equação 2 assumir a forma linear e aditiva.

Devido a dificuldade que o decisor possua para compreender os valores da equação 3, Da Silva et al. [2020] usam o conceito de incremento de risco para aumentar a compreensão do decisor na interpretação dos resultados.

É mostrado em de Almeida et al. [2015] que a razão de incremento norteia as decisões referentes a mitigação de riscos pelo fato de mostrar a distância que as alternativas de ação possuem entre si. Esta avaliação é possível pois ambos são medidas de utilidade, cuja escala intervalar fornece o quanto se ganha ao passar de uma alternativa para outra. Portanto, valores maiores de razão das diferenças entre as seções significa que elas contribuem globalmente mais para a mitigação dos riscos quando comparada às seções seguintes.

Ademais, para enriquecer as informações disponibilizadas, as ferramentas de mapeamento de riscos e visualização gráfica aprimoram os resultados cardinais e ordinais da priorização.

4. Aplicação Numérica: cidade do nordeste brasileiro

Para validar o impacto climático no modelo de decisão apresentado na Seção 3 para avaliar os riscos de inundação em uma área urbana, uma aplicação numérica é descrita nesta seção. Dados realistas, baseados em dados reais de um município do Nordeste do Brasil, são usados para simular o problema. Esse município ocupa uma área de aproximadamente 234 km² e tem uma população em torno de 43 mil, segundo estimativas de 2019 [IBGE, 2019]. Historicamente, esta área urbana foi afetada por precipitações extremas. O pior evento foi em 2010, quando chuvas extremas quase destruíram o município.

Esta simulação considera o gestor público da administração local como decisor do problema, cujas escolhas e julgamentos probabilísticos são cruciais para o processo de decisão. Dez áreas estratégicas representam o conjunto de alternativas $\boldsymbol{A}$ (figura 2-a). As alternativas nesta aplicação são chamadas de índices L1 a L10.

Dado que a lâmina d'água decorrente da precipitação não pode ser controlada e é ainda agravada pelos efeitos climáticos futuros, analista e especialistas auxiliam na caracterização dos três cenários de risco: θ_1 considera precipitação leve/moderada de até 65 mm/dia; analogamente, precipitação diária entre 65 mm e 110 mm é moderada/intensa e define o cenário θ_2; e θ_3 corresponde a uma precipitação extrema, acima dos 110 mm/dia.

Para estimar os impactos climáticos futuros na tomada de decisão, assume-se que os padrões de precipitação se alteram segundo as duas projeções de emissão de gases de efeito estufa. O protocolo sugerido na seção 3.1 foi aplicado ao estudo de caso, cuja base de dados dos quatro modelos climáticos em questão foi simulada para a série histórica de 1961-2005, para validação do modelo quanto aos dados reais emitidos pela estação climática mais próxima do local. Ambos os dados foram retirados da plataforma PROJETA, gerados pelo CPTEC/INPE.

Os dados abertos registram as medições real e simuladas para os modelos climáticos disponíveis das precipitações máximas diárias durante o horizonte de análise. Isso permitiu que uma análise estatística por meio de testes de hipóteses realizasse uma primeira triagem dos

modelos que possuem significância estatística para traduzirem os valores observados. Testes de Mann-Kendall avaliaram a tendência dos dados simulados com nível de significância de 5%. Todos os modelos climáticos rejeitaram a hipótese nula da não existência de tendência na série. Os dados observados na base consultada entre 1961-2005 na estação climática reforçaram que os modelos acompanham a mesma tendência da série histórica real. Testes de ajuste a distribuição GEV foram realizadas, também com α = 0,05, o que comprovou o bom ajuste de todos os modelos à função (equação 1) no modelo de decisão.

Da análise preliminar, os modelos são validados quanto ao grau de adequação e desempenho com relação à série histórica real. A figura 2-c sumariza a distância média que o viés (MVP) de cada modelo possui aos dados observados. Além disso, foi calculada a raiz do erro médio quadrático, índice de desempenho das simulações. Valores menores indicam melhor desempenho. Sendo assim, o protocolo estabelecido consolidou a escolha do modelo HadGEM2-ES como o mais adequado ao local de estudo: índice MVP regular indica que simulação deste modelo tem viés reduzido; já o índice REMQ, o menor entre os demais, ressalta seu desempenho.

Isso permitiu que o decisor simulasse o regime hidrológico futuro num horizonte futuro de 30 anos (2021-2050) segundo o modelo climático escolhido para as duas projeções de emissão de GEE (figura 2-b). Uma breve análise gráfica, que se revela numericamente a posteriori, evidencia que a projeção RCP 8.5 (pessimista) prevê precipitações intensas mais frequentes que a otimista. O ajuste a função GEV define parâmetros de contorno dos diferentes níveis de severidade adotados pelo decisor (figura 2-b), para cada projeção climática.

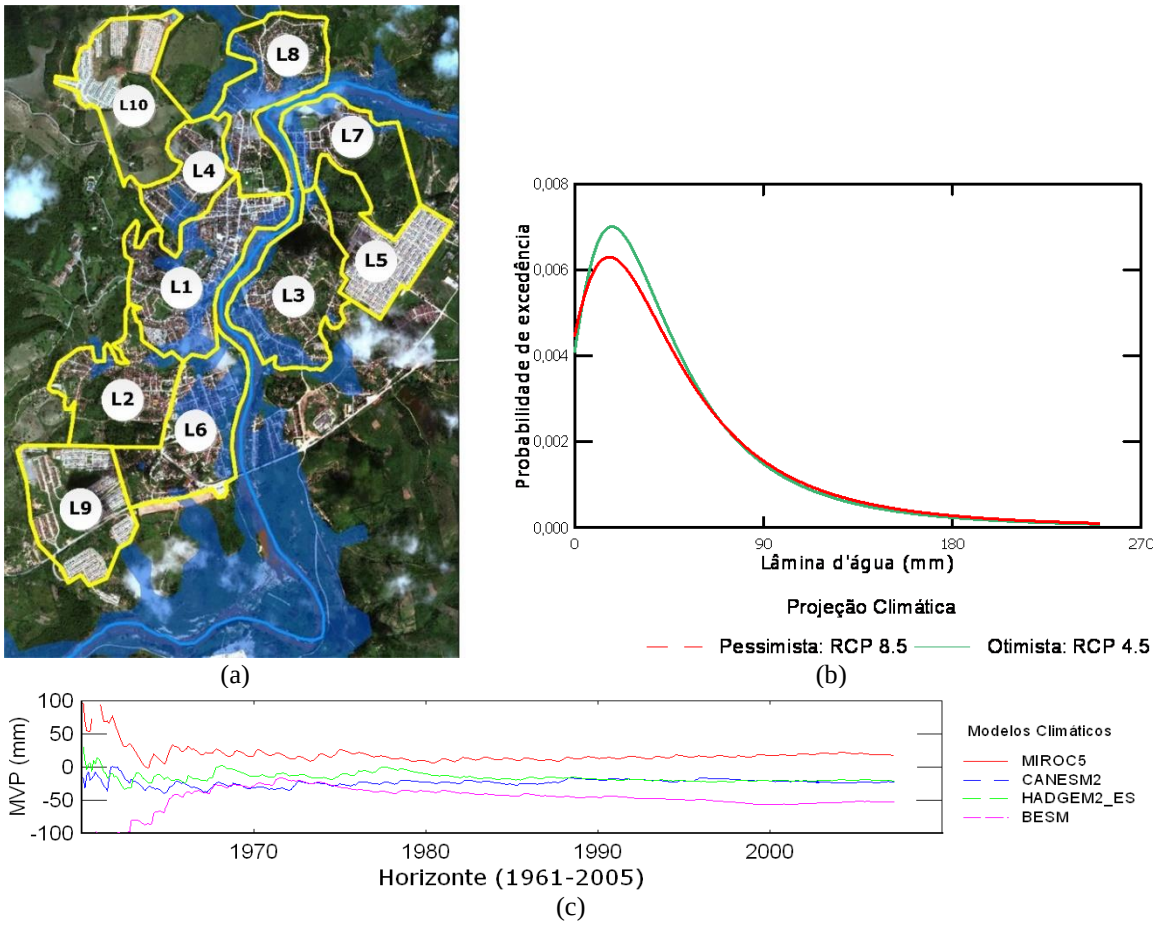


Figura 2 – (a) Delimitação do conjunto de alternativas no estudo de caso. (b) Curvas de distribuição de lâmina d'água diária (mm) para as projeções climáticas RCP 4.5 e RCP 8.5. (c) Análise de adequação das previsões climáticas à série histórica real medida.

Como consequência, são calculadas as probabilidades a priori no modelo de decisão, a saber: $\pi(\theta_1)$ = 0,7308; $\pi(\theta_2)$ = 0,1601 e $\pi(\theta_3)$ = 0,1091 para a projeção otimista ou RCP 4.5; $\pi(\theta_1)$ = 0,7084; $\pi(\theta_2)$ = 0,1587e $\pi(\theta_3)$ = 0,1330 para a projeção pessimista ou RCP 8.5.

O procedimento colocado por Keeney e Raiffa [1976] orienta o processo de elicitação das preferências do decisor, ou $u(x)$, por meio de loterias hipotéticas. Foram estimadas também $P(x|\,\theta, a_i)$ para cada critério. Em geral, as funções consequência representam o comportamento estocástico social, humano e econômico da enchente. Para esta aplicação, a distribuição de Poisson é apropriada para os dois primeiros critérios, enquanto que o econômico se utilizou da distribuição lognormal.

No final do modelo de decisão, o modelo usa o MAUT para obter as constantes da escala e compila parâmetros importantes para agregação de risco em uma única métrica multidimensional. Esse procedimento também é realizado via elicitação, comparando as loterias, conforme estabelecido no protocolo estruturado por Keeney e Raiffa [1976]. As constantes de escala para os critérios social, humano e econômico são, respectivamente, 0,343, 0,384 e 0,273.

De posse de todos esses parâmetros, os resultados podem ser obtidos, cuja exposição e discussão serão realizadas na próxima seção.

5. Resultados e discussão

Os resultados da aplicação da decisão multicritério são apresentados nas tabelas 3 e 4, de acordo com as projeções climáticas otimista e pessimista para os próximos 30 anos (2021-2050), respectivamente. A escala intervalar das funções utilidade permite fazer comparações de incrementos de risco em relação às áreas em posições adjacentes no ranking de modo que aprimorou a visualização do risco ao decisor.

Tabela 3 – Priorização de risco multidimensional para o período 2021-2050 com projeção RCP 4.5

Ordem	Alternativa	Incremento de risco (10^{-4})	Razão de incremento (%)
1	L10	0,54	1.59
2	L7	33,73	134.62
3	L5	25,06	255.22
4	L2	9,82	378.16
5	L6	2,60	53.09
6	L4	4,89	28.49
7	L8	17,17	695.53
8	L3	2,47	12.14
9	L1	20,33	-
10	L9	-	-

Tabela 4 – Priorização de risco multidimensional para o período 2021-2050 com projeção RCP 8.5

Ordem	Alternativa	Incremento de risco (10^{-4})	Razão de incremento (%)
1	L7	2,46	6.64
2	L10	37,02	147.17
3	L5	25,16	341.01
4	L2	7,38	213.16
5	L4	3,46	44.88
6	L6	7,71	51.19
7	L8	15,06	326.84
8	L3	4,61	22.19
9	L1	20,77	-
10	L9	-	-

Além disso, o modelo fornece ao decisor uma melhor percepção da situação de risco através de um mapeamento do risco multidimensional: a disposição espacial do risco de inundação de cada área – equação 3 – como mostrado na figura 3. Vale ressaltar que existe um gradiente de cores que se relaciona a criticidade do risco em questão: regiões mais claras ou indicam alternativas menos prioritárias, ao passo que regiões de coloração forte são mais prioritárias. Além disso, deve-se notar que tal gradiente indica apenas a ordem de alternativas relacionadas a avaliação de risco.

Portanto, a integração dos resultados obtidos no modelo proposto com o mapeamento contribui para a tomada de decisões, ajudando assim o decisor a adotar ações para reduzir os impactos das enchentes. Por exemplo, uma extensa análise das tabelas 3 e 4 pode ser

conduzida ao priorizar os riscos de inundação. Assim, o maior risco global para as projeções otimista e pessimista foram obtidas nas alternativas L10 e L7, respectivamente. Por outro lado, L9 foi considerada a alternativa menos prioritária para ambas as projeções climáticas.

No entanto, é essencial entender que alternativas em menos prioritárias não significam necessariamente riscos de baixa magnitude para o município. De um modo geral, o modelo gera tais informações pela análise da razão de incrementos de risco. Logo, é útil para que o decisor avalie, em termos de crescimento de magnitude, a prioridade entre as alternativas em termos quantitativos. O foco principal é determinar soluções mais apropriadas para mitigar os riscos de enchente, levando em consideração os desafios que o gestor enfrenta na alocação de recursos financeiros, humanos e técnicos.

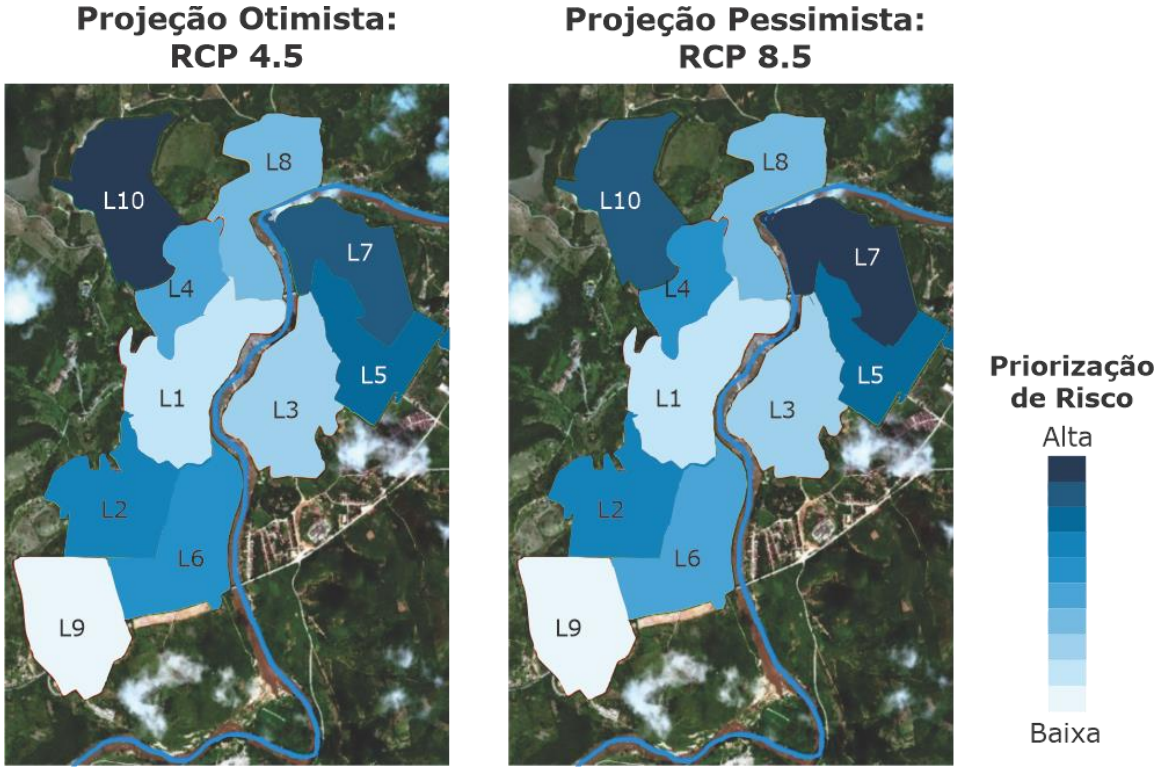


Figura 3 – Mapeamento do risco multidimensional de inundações no estudo de caso para o horizonte de 2021-2050 considerando diferentes projeções de emissão de GEE otimista e pessimista.

Por exemplo, cabe destacar na comparação de áreas como L8, L3 e L1, diferenças consideráveis quanto ao impacto do risco. Na projeção otimista, um incremento nas magnitudes de risco de L1 para L8 cresce a uma taxa de quase 700%, enquanto que na projeção pessimista essa taxa cai aproximadamente pela metade (isto é, os valores de risco triplicam entre as alternativas citadas). Tendo em mente que os recursos podem ser limitados, a discussão anterior apresenta uma diferença significativa de magnitude entre as regiões, de modo que o gestor considere tal informação para compreender melhor em qual área as ações de mitigação devem ser realizadas.

Por fim, cabe ainda ressaltar as mudanças de ordenação observadas entre as alternativas de acordo com as projeções de emissão de GEE (L4 e L6, e L7 e L10). A comparação entre esses resultados ressalta que emissões maiores mudam as prioridades entre as regiões, fato este que também deve ser levado em conta na tomada de decisão. Somado aos recursos disponíveis e com auxílio de especialistas, o gestor também pode usar desta informação para balancear recursos, avaliar o benefício de adotar soluções conservadoras – quando se prioriza conforme a projeção

pessimista, ou desenvolver escopo de ações integradas entre regiões de modo a considerar as vasta gama de informações provida pelo modelo de decisão.

6. Conclusões

O presente trabalho contribui para o estado da arte levando em consideração os efeitos climáticos na avaliação de riscos de enchentes urbanas em um modelo multidimensional. Ele considera três critérios de perda: social, humano, econômico. Destaca-se por incorporar aspectos probabilísticos usando a abordagem MAUT.

O modelo foi validado em uma cidade do nordeste do Brasil. O modelo ajuda o decisor a priorizar riscos em regiões estratégicas segundo dois cenários de emissão de GEE, permitindo assim que os recursos escassos sejam gerenciados e alocados de forma preventiva em longo prazo àquelas mais críticas. Além disso, a visualização gráfica e o mapeamento de riscos fornecem ao decisor uma vasta gama de informações, revelando a flexibilidade que o modelo de decisão possui em ser replicado para qualquer área urbana do mundo.

Portanto, o modelo suporta o processo de tomada de decisão porque permite ao gestor integrar os resultados multidimensionais, mapeamento e projetados estrategicamente para combater inundações futuras. Assim, o modelo contribui para reduzir o risco de desastres nos centros urbanos, aumentando a resiliência urbana.

Estudos futuros incluem a extensão para um contexto de decisão em grupo, pois a administração local envolve diferentes gestores públicos que têm os mesmos deveres e responsabilidades. Deve-se notar que novos modelos climáticos podem ser incluídos, bem como o modelo pode levar em consideração outros impactos da enchente em ambientes urbanos.

Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com apoio do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) – Código de Financiamento 001.

Referências

Alderman, K.; Turner, L. R.; Tong, S. (2012). Floods and human health: A systematic review. *Environment International*, v. 47, p. 37–47.

Arora, V. K.; Scinocca, J. F.; Boer, G. J.; Christian, J. R.; Denman, K. L.; Flato, G. M.; Kharin, V. V.; Lee, W. G.; Merryfield, W. J. (2011). Carbon emission limits required to satisfy future representative concentration path ways of greenhouse gases. *Geophysical Research Letters*, v. 38, n. 5, p. L05805.

Aven, T. (2019). Climate change risk – what is it and how should it be expressed? *Journal of Risk Research*, v. 0, n. 0, p. 1–18.

Collins, W. J., Bellouin, N., Doutriaux-Boucher, M., Gedney, N., Halloran, P., Hinton, T., Hughes, J., Jones, C. D., Joshi, M., Liddicoat, S., Martin, G., O'Connor, F., Rae, J., Senior, C., Sitch, S., Totterdell, I., Wiltshire, A., and Woodward, S. (2011). Development and evaluation of an Earth-System model – HadGEM2, *Geosci. Model Dev*., 4, 1051–1075.

Da Silva, L.B.L.; Humberto, J. S. ; Lima, L. E. S. ; Alencar, M. H. ; Almeida, J. A. ; De Almeida, A. T. (2019). Multicriteria Modelling for Managing Flood Risks in Urban Areas. In: 29th European Safety and Reliability Conference, 2019, Hannover. Anais... Singapore: Research Publishing Services, p. 3714-3722.

Da Silva, L. B. L.; Humberto, J. S. ; Alencar, M. H. ; Ferreira, R. J. P. ; De Almeida, A. T. (2020). GIS-based multidimensional decision model for enhancing flood risk prioritization in urban areas. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, v. 48, p. 101582.

Galoá { Este trabalho foi publicado utilizando o **Galoá** proceedings

De Almeida, A.T., Cavalcante, C.A.V., Alencar, M.H., Ferreira, R.J.P., de Almeida-Filho, A.T., Garcez, T.V. (2015). Multicriteria and Multiobjective Models for Risk, Reliability and Maintenance Decision Analysis. International Series in Operations Research and Management Science, 231, Springer, Cham.

De Almeida, A.T., Alencar, M.H., Garcez, T.V., Ferreira, R.J.P. (2016). A systematic literature review of multicriteria and multi-objective models applied in risk management. IMA Journal of Management Mathematics, v. 28, p. 153–184.

Douglas I, Alam K, Maghenda M, Mcdonnell Y, Mclean L, Campbell J. (2008). Unjust waters: climate change, flooding and the urban poor in Africa. *Environment and Urbanization*, 20(1):187-205.

Heo, B. Y.; Heo, W. H. (2019). Economic analysis of disaster management investment effectiveness in Korea. *Sustainability (Switzerland)*, v. 11, n. 11, p. 1–13.

Hettiarachchi, S.; Wasko, C.; Sharma, A. (2019). Can antecedent moisture conditions modulate the increase in flood risk due to climate change in urban catchments? *Journal of Hydrology*, v. 571, n. January, p. 11–20.

Hoegh-Guldberg, O. et al. Chapter 3: Impacts of 1.5°C global warming on natural and human systems. In: Global Warming of 1.5 °C. An IPCC special report on the impacts of global warming of 1.5 °C above preindustrial levels and related global greenhouse gas emission pathways [...]. In: [s.l: s.n.]. p. 175–311.

INPE. Projeções de Mudança do Clima para a América do Sul Regionalizadas pelo modelo ETA. <https://projeta.cptec.inpe.br/> Acessado em 30/04/20.

IPCC. (2013). Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (eds.). Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 pp.

Jonkman, S. N.; Maaskant, B.; Boyd, E.; Levitan, M. L. (2009). Loss of life caused by the flooding of New Orleans after hurricane Katrina: Analysis of the relationship between flood characteristics and mortality. *Risk Analysis*, v. 29, n. 5, p. 676–698.

Keeney, R. L.; Raiffa, H. (1976). Decisions with Multiple Objectives: Preferences and Value Trade-Offs. New York: JohnWiley and Sons.

Kenyon, W. (2007). Evaluating flood risk management options in Scotland: A participant-led multi-criteria approach. *Ecological Economics*, v. 64, n. 1, p. 70–81.

Morrison, A.; Noble, B. F.; Westbrook, C. J. (2019). Flood Risk Management in Canada's Prairie Provinces: an Analysis of Decision-Maker Priorities and Policy Preferences. *Environmental Management*, v. 64, n. 5, p. 608–625.

Nobre, P.; Siqueira, L. S. P.; Almeida, R. A. F. De.; Malagutti, M.; Giarolla, E.; Castelão, G. P.; et al. (2013). Climate Simulation and Change in the Brazilian Climate Model. *Journal of Climate*, v. 26, p. 6716-6732.

Priori, L.; Alencar, M. H.; De Almeida, A. T. (2017). Adaptations to Possible Climate Change Impacts: Problem Structuring Based on VFT Methodology. In: Leal Filho, W. (Ed.). Innovation in Climate Change Adaptation. Cham: Springer International Publishing. p. 145–157.

Watanabe, M.; Suzuki, T.; O'ishi, R.; Komuro, Y.; Watanabe, S.; et al. (2010). Improved Climate Simulation by MIROC5: Mean States, Variability, and Climate Sensitivity. *Journal of Climate*, v. 23, p. 6312-6335.

Galoá { Este trabalho foi publicado utilizando o **Galoá** proceedings