



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO  
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

LUCAS BORGES LEAL DA SILVA

**DECISÃO MULTICRITÉRIO GEORREFERENCIADA PARA PRIORIZAÇÃO DE  
RISCOS DE INUNDAÇÕES EM ÁREAS URBANAS SOB EFEITO DAS MUDANÇAS  
CLIMÁTICAS**

Recife

2022

LUCAS BORGES LEAL DA SILVA

**DECISÃO MULTICRITÉRIO GEORREFERENCIADA PARA PRIORIZAÇÃO DE  
RISCOS DE INUNDAÇÕES EM ÁREAS URBANAS SOB EFEITO DAS MUDANÇAS  
CLIMÁTICAS**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para a obtenção do título de Doutor em Engenharia de Produção.

Área de concentração: Pesquisa Operacional.

Orientador: Prof. Dr. Adiel Teixeira de Almeida.

Coorientador: Prof. Dr. Marcelo Hazin Alencar.

Recife

2022

Catálogo na fonte  
Sandra Maria Neri Santiago, CRB-4 / 1267

S586d Silva, Lucas Borges Leal da.  
Decisão multicritério georreferenciada para priorização de riscos de inundações em áreas urbanas sob efeito das mudanças climáticas / Lucas Borges Leal da Silva. – 2022.  
138 f.: il., figs., tabs., abrev. e sigl.

Orientador: Prof. Dr. Adiel Teixeira de Almeida.  
Coorientador: Prof. Dr. Marcelo Hazin Alencar.  
Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-graduação em Engenharia de Produção, Recife, 2022.  
Inclui referências e apêndice.

1. Engenharia de produção. 2. Risco de inundação. 3. Mudanças climáticas.  
4. Apoio à decisão multicritério. 5. MAUT. 6. NSMAUT. 7. Análise da decisão. I. Almeida, Adiel Teixeira de (Orientador). II. Alencar, Marcelo Hazin (Coorientador). III. Título.

UFPE

658.5 CDD (22. ed.) BCTG/2022-178

LUCAS BORGES LEAL DA SILVA

**DECISÃO MULTICRITÉRIO GEORREFERENCIADA PARA PRIORIZAÇÃO DE  
RISCOS DE INUNDAÇÕES EM ÁREAS URBANAS SOB EFEITO DAS MUDANÇAS  
CLIMÁTICAS**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, como requisito parcial para a obtenção do título de Doutor em Engenharia de Produção. Área de Concentração: Pesquisa Operacional.

Aprovada em: 09/05/2022.

**BANCA EXAMINADORA**

---

Prof. Dr. Adiel Teixeira de Almeida (Orientador)  
Universidade Federal de Pernambuco

---

Prof. Dr. Marcelo Hazin Alencar (Coorientador)  
Universidade Federal de Pernambuco

---

Profa. Dra. Ana Paula Cabral Seixas Costa (Examinadora interna)  
Universidade Federal de Pernambuco

---

Profa. Dra. Danielle Costa Morais (Examinadora interna)  
Universidade Federal de Pernambuco

---

Prof. Dr. Luís Miguel Cândido Dias (Examinador externo)  
Universidade de Coimbra

---

Profa. Dra. Maria Clara Fava (Examinadora externa)  
Universidade Federal de Viçosa

## AGRADECIMENTOS

A Deus, primeiramente, por me conceder fortaleza para superar os desafios da vida, determinação para alcançar meus sonhos e serenidade para lidar com as dificuldades.

A meus pais, Antônio e Patrícia, meu irmão, Gabriel, minha noiva, Maria Clara, e demais familiares, pela compreensão e apoio incondicional ao longo desta etapa, sempre torcendo por minhas decisões pessoais e profissionais.

Ao professor e orientador Adiel Teixeira de Almeida, pelo acompanhamento, prontidão, paciência e amizade durante os quase oito anos de convivência, desde a minha Iniciação Científica. Meu profundo respeito e admiração.

Ao professor e coorientador Marcelo Hazin Alencar, pelo incentivo, constante auxílio e entusiasmo em tantos momentos. Minha imensa gratidão.

Aos demais professores do Departamento, em nome de Ana Paula, Danielle, Eduarda, Lúcia e Rodrigo, estendo meus agradecimentos àqueles que, pela parceria, conselhos e suporte nesta jornada, também contribuíram para moldar, com a convivência o profissional que almejo ser.

Aos meus colegas do PPGEF, em especial dos grupos de pesquisa REASON e CDSID, pela amizade gratuita, alegria e entusiasmo que tornaram esta fase mais fácil e prazerosa.

Aos examinadores externos, professores Luís Dias e Maria Clara Fava, pelos importantes comentários e sugestões que certamente contribuíram para a melhoria desta tese.

Agradeço também ao CNPq, CAPES e FACEPE pelo suporte financeiro proporcionado direta e/ou indiretamente para a elaboração desta pesquisa.

Por fim, a todos que estiveram sempre presentes, nos bons e maus momentos.

## RESUMO

A adaptação urbana implica no combate aos efeitos multifacetados do clima e exigem que gestores públicos proponham uma ampla agenda entre instituições técnico-científicas públicas e privadas, a fim de tomar decisões preventivas, eficientes e inovadoras em relação à ocorrência de inundações. Nesse contexto, este trabalho contribui com o estado-da-arte ao propor modelos de priorização de risco de inundação em áreas urbanas segundo uma abordagem multicritério. Para tanto, a tese explora a modelagem multidimensional para apoiar o processo decisório inserindo as preferências do decisor, em termos de utilidade esperada (EU), com o uso da Teoria da Utilidade Multi-Atributo (MAUT), Análise da Decisão e avanços metodológicos importantes na área. Em meio a fatores ambientais, financeiros, humanos, de mobilidade e sociais, os modelos tratam da avaliação de riscos combinando as fontes de perigo e suas consequências com EU sob uma perspectiva estacionária a curto e longo prazo. Em contraponto a isto, esta tese também propôs um novo método multicritério para inserir a dependência temporal à modelagem baseada em EU no MAUT tradicional. Intitulado NSMAUT, o novo método introduz o fenômeno da impaciência pelo decisor ao julgar, em termos de utilidade, sua preferência pelo recebimento de consequências em um estado futuro, com auxílio de técnicas de previsão climática e demográfica. Para tanto, as aplicações numéricas deste trabalho foram desenvolvidas pelo Sistema de Apoio a Decisão (SAD) desenvolvido como resultado deste trabalho. O SAD explora ferramentas estatísticas com análise de sensibilidade, de georreferenciamento e de visualização gráfica para fornecer ao decisor uma ampla gama de informações para que o decisor fundamente com credibilidade suas decisões estratégicas. Consequentemente, as contribuições exploradas nesta tese têm o potencial de aprimorar múltiplos impactos, seja de ordem financeira, social ou ambiental. Assim, os resultados compartilham evidências importantes que apoiam os *stakeholders* na alocação de recursos financeiros para financiar medidas de adaptação climática, na conservação ambiental e no combate às desigualdades sociais a partir da remodelação de políticas de adaptação urbana sob efeitos climáticos e de urbanização. Embora os modelos propostos tenham perspectivas diferentes em relação ao mesmo problema, os modelos são complementares, compartilham insights úteis e podem ser utilizados em um contexto prático baseado nas necessidades e limitações locais, sendo replicáveis a qualquer espaço urbano.

**Palavras-chave:** risco de inundação; mudanças climáticas; apoio à decisão multicritério; MAUT; NSMAUT; análise da decisão.

## ABSTRACT

Urban adaptation implies combating the multifaceted effects of the climate and requires public managers to propose a broad agenda between public and private technical-scientific institutions, in order to take preventive, efficient, and innovative decisions concerning floods. Given this backdrop, this work contributes to the state-of-the-art by proposing flood risk prioritization models in urban areas under the multicriteria approach. Therefore, this thesis explores multidimensional modeling to support the decision-making process, thereby inserting the decision-maker's (DM's) preferences, in terms of expected utility (EU), by using the Multi-Attribute Utility Theory (MAUT), Decision Analysis and other important methodological advances in this field. Comprising environmental, financial, human, mobility, and social issues simultaneously, the models deal with risk assessment by combining the sources of hazard and its consequences with EUs under a stationary perspective, in short- and long-term decisions. On the other hand, a new multicriteria method was structured to introduce time dependence into the EU-based modeling in traditional MAUT. The Non-Stationary MAUT (NSMAUT) method inserts the increasing impatience by the DM when judging, in terms of utilities, his/her preference for receiving outcomes in the future, with the aid of climatic and demographic forecasting techniques. Numerical applications were performed with a Decision Support System developed as a product from this work. It comprises statistical tools with sensitivity analysis, georeferencing, and graphical visualization that provide the DM with a wide range of information so that he/she justifies their strategic decisions under credibility. Consequently, the contributions explored in this work have the potential to promote financial, social, and environmental. This sense, our findings share important evidence that supports policymakers in allocating financial resources to fund adaptation measures, promoting environmental preservation, and combating social inequalities and pessimistic climate projections from integrated urban adaptation planning under climate and urbanization effects. Although the models proposed have different perspectives regarding the same problem, the models are complementary, they share useful insights and can be used in a practical context based on local needs and limitations, being replicable to any urban space.

**Keywords:** flood risk; climate change; multi-criteria decision making/aiding; MAUT; NSMAUT; decision analysis.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 –	Fluxograma com escopo da tese e seus produtos/ publicações.....	21
Figura 2 –	Fluxograma com as estratégias de pesquisa para a RSL.....	36
Figura 3 –	Fluxograma para aplicação dos modelos de decisão MCDM/A estacionários a curto e longo prazo.....	48
Figura 4 –	Análise de frequência de inundações (estimativa de probabilidade) para modelagem de cenários de perigo.....	58
Figura 5 –	Esquema de elicitación das utilidades unidimensionais com base no protocolo de Keeney & Raiffa (1976).....	60
Figura 6 –	Esquema de elicitación das constantes de escala com MAUT a partir do protocolo de Keeney & Raiffa (1976).....	61
Figura 7 –	Gráfico de boxplot com índices de desempenho dos MCGs utilizando a plataforma PROJETA (CPTEC/INPE, 2021).....	71
Figura 8 –	Gráfico com os regimes de precipitação até 2100 conforme as projeções RCP 4.5 e 8.5 com o modelo climático BESM.....	72
Figura 9 –	Localização do estudo de caso e mapeamento de risco multidimensional de inundação urbana do Recife (RPA-5) para 2021 e 2021 – 2100 nos cenários RCP 4.5 e 8.5.....	75
Figura 10 –	Gráfico de boxplot dos valores de $\tau$ de Kendall para os cenários climáticos vigente, de estabilização (RCP 4.5) e pessimista (RCP 8.5), respectivamente.....	79
Figura 11 –	Dashboard do ranking original e percentual de mudanças na priorização de risco para os cenários climáticos vigente, e futuros.....	82
Figura 12 –	Esquema de categorização da atitude do decisor em relação ao risco para a AS (A). Gráfico de rosca sobre a distribuição de atitudes de risco para cada atributo obtido na AS, em % de 50.000 replicações (B).....	83
Figura 13 –	Fluxograma do modelo atributo não estacionário para priorização dos riscos de inundação urbana com o NSMAUT.....	88
Figura 14 –	Esquema do processo de elicitación com o PTT no método NSMAUT...	96
Figura 15 –	Gráfico 3D de GEV(1,1,0) entre 2021 e 2100 para a RPA-5 (Recife, Pernambuco).....	101
Figura 16 –	Análise comparativa de GEV(1,1,0) em diferentes instantes de tempo	102

	para a RPA-5 (Recife, Pernambuco).....	
Figura 17 –	(A) A função utilidade para o atributo humano, considerando $t = t_d$ (tempo de decisão); (B) A taxa de desconto no tempo para o atributo humano, para $t > t_d$ .....	103
Figura 18 –	Mapeamento de Risco Multidimensional de Inundação Urbana do Recife (RPA-5) para 2021 – 2100 nos cenários RCP 4.5 e SSP3.....	106
Figura 19 –	Apresentação da interface de acesso do SAD para análise de risco com base nos modelos de risco apresentados nesta tese.....	110
Figura 20 –	Fluxograma de funcionalidades do SAD para análise e priorização de riscos de inundação, análise de sensibilidade e exportação de resultados com base nos modelos estacionários de da Silva et al. (2020) e da Silva, Alencar & de Almeida (2022a).....	111
Figura 21 –	Tela de criação de um estudo de caso e gestão de equipe para análise de risco no perfil usuário-decisor.....	113
Figura 22 –	Tela de ajuste de curva da função utilidade após processo de elicitación com o protocolo de Keeney & Raiffa (1976).....	115
Figura 23 –	Tela de elicitación das constantes de escala com MAUT (etapa inicial)..	115
Figura 24 –	Tela de resultados com priorização e mapeamento dos riscos.....	116
Figura 25 –	Fluxograma de funcionalidades do SAD para análise e priorização de riscos de inundação e exportação de resultados com base no NSMAUT (DA SILVA; ALENCAR; DE ALMEIDA, 2022b).....	118
Figura 26 –	Esquema do processo de elicitación com o PTT no método NSMAUT no SAD FloodMATTERS.....	119

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 –	Conjunto combinado de palavras-chave, utilizado para compor a estratégia inicial da RSL.....	35
Tabela 2 –	Resumo das principais evidências após mapeamento do estado da arte com a RSL.....	44
Tabela 3 –	Resumo dos atributos de decisão para os modelos propostos, seguindo os objetivos de Desenvolvimento Sustentável Urbano (ICLE, 2020).....	51
Tabela 4 –	Principais MCGs utilizados pelo INPE para previsão climática no Brasil.....	55
Tabela 5 –	Descrição dos cenários de perigo utilizados para obter probabilidades a-priori nos modelos propostos.....	56
Tabela 6 –	Esquema dos principais pressupostos para variações de entrada na AS..	65
Tabela 7 –	Parâmetros-chave para mensuração de $f_{atr}(x \theta,ai)$ e resultados da elicitación de preferências do decisor com MAUT.....	73
Tabela 8 –	Ranking de risco de inundação urbana: análise a curto prazo (DA SILVA et al., 2020) e longo prazo (DA SILVA; ALENCAR; DE ALMEIDA, 2022a) com seus respectivos índices de magnitude relativa.....	74
Tabela 9 –	Estatística descritiva dos valores de $\tau$ de Kendall e respectivos rankings para cada padrão de simulação.....	79
Tabela 10 –	Resumo de evidências e insights compartilhados após análise de risco com os modelos propostos neste capítulo.....	85
Tabela 11 –	Resumo e estatísticas das funções GEV estacionárias e não estacionárias com MLE.....	101
Tabela 12 –	Ranking de Risco de Inundação Urbana e índices de magnitude relativa (RMI) para 2021-2100 com o NSMAUT.....	105

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

A-D	Teste Estatístico de Anderson-Darling
AHP	Analytic Hierarchy Process
AIC	Cr�terio de Informa�o de Akaike (Akaike Information Criterion)
AS	Análise de Sensibilidade
BESM	Brazilian Earth System Model
BIC	Cr�terio de Informa�o Bayesiano (Bayesian Information Criterion)
CanESM2	Canadian Earth System Model 2
CPT	Teoria do Prospecto Cumulativa (Cumulative Prospect Theory)
EMA	Erro Médio Absoluto
EU	Utilidade Esperada (Expected Utility)
EMV	Estimador de Máxima Verossimilhança
FDP	Fun�o Densidade de Probabilidade
FloodD	Decision Support System for Flood Decision Modeling and Analysis
MATTERS	Towards Temporal Risk Evaluation in Sustainable Cities
FRM	Gerenciamento de Risco de Inunda�o (Flood Risk Management)
GEE	Gases de Efeito Estufa
GEV	Distribui�o Generalizada de Valor Extremo (Generalized Extreme Value)
GIS	Sistema de Informa�o Georreferenciada (Georeferencing Information System)
HadGEM2-ES	Hadley Global Environment Model 2 - Earth System
IMR	�ndice de Magnitude Relativa (de Risco)
INPE	Instituto Nacional de Pesquisa Espaciais
INPI	Instituto Nacional da Propriedade Industrial
IPCC	Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (Intergovernmental Panel on Climate Change)
K-S	Teste Estatístico de Kolmogorov-Smirnov
LI	Limite Inferior
LRT	Teste da razão de verossimilhança (Likelihood-Ratio Test)
LS	Limite Superior
MAUT	Teoria da Utilidade Multi-Atributo (Multi-Attribute Utility Theory)
MCDM/A	Apoio a Decisão Multi-Cr�terio (Multi-Criteria Decision Making/Aiding)
MCG	Modelo de Circula�o Geral da Atmosfera

MIROC5	Model for Interdisciplinary Research On Climate
MLE	Estimativa por Máxima Verossimilhança (Maximum Likelihood Estimation)
Non-EU	Utilidade Não-Esperada (Non-Expected Utility)
NSMAUT	Teoria da Utilidade Multi-Atributo Não-Estacionária (Non-Stationary Multi-Attribute Utility Theory)
OMS	Organização Mundial da Saúde
ONU	Organização das Nações Unidas
PROMETHEE	Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluation
PTT	Probability and Time Trade-Off
RCP	Representative Concentration Pathway
RDU	Utilidade Dependente de Rank (Rank-Dependent-Utility)
REMQ	Raiz do Erro Médio Quadrático
RSL	Revisão Sistemática da Literatura
SAD	Sistema de Apoio a Decisão
SMC	Simulação Monte Carlo
SSP	Shared Socioeconomic Pathways
TOPSIS	Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution
TTO	Time Trade-Off

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>15</b>
1.1	Justificativa e Relevância.....	18
1.2	Objetivos do Trabalho.....	19
1.2.1	<i>Objetivo Geral.....</i>	20
1.2.2	<i>Objetivos Específicos.....</i>	20
1.3	Estrutura da Tese.....	20
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>23</b>
2.1	Fundamentação Teórica.....	23
2.1.1	<i>Gerenciamento de riscos de desastres naturais: um enfoque nas inundações .....</i>	23
2.1.2	<i>Modelagem de decisão MCDM/A baseados em risco com a Teoria da Utilidade.....</i>	26
2.1.3	<i>Avanços metodológicos em utilidade: os desvios de linearidade quanto a probabilidade e tempo.....</i>	29
2.2	Revisão Bibliográfica sobre modelagem de decisão multidimensional baseada em risco para gerenciamento de inundações em meio aos efeitos climáticos.....	32
2.2.1	<i>Perguntas motivadoras e apresentação do protocolo de pesquisa.....</i>	32
2.2.2	<i>Metodologia para revisão sistemática da literatura (RSL).....</i>	33
2.2.3	<i>Mapeamento dos resultados: discussão e insights.....</i>	36
2.3	Síntese do Estado da Arte e Posicionamento desta Tese.....	43
<b>3</b>	<b>MODELOS DE DECISÃO MULTIATRIBUTO E ESTACIONÁRIO PARA AVALIAÇÃO DE RISCO DE INUNDAÇÃO URBANA COM MAUT E ANÁLISE DA DECISÃO.....</b>	<b>47</b>
3.1	Descrição do modelo baseado em utilidade sob as perspectivas atual e futura de risco.....	47
3.1.1	<i>Identificação do(s) decisor(es) e outros atores do processo.....</i>	49
3.1.2	<i>Identificação dos objetivos.....</i>	50
3.1.3	<i>Estabelecimento dos critérios relevantes.....</i>	50
3.1.4	<i>Estabelecimento da estrutura do espaço de ações, da problemática e desenvolvimento do processo de geração de alternativas.....</i>	52
3.1.5	<i>Avaliação e identificação de fatores não controlados: os estados da</i>	53

	<i>Natureza.....</i>	
3.1.6	<i>Modelagem de preferências do decisor.....</i>	58
3.1.7	<i>Avaliação intra-critério.....</i>	59
3.1.8	<i>Avaliação intercritério.....</i>	61
3.1.9	<i>Avaliação global das alternativas.....</i>	62
3.1.10	<i>Análise de sensibilidade e robustez, análise dos resultados e elaboração de recomendação para o decisor.....</i>	64
3.1.11	<i>Implementação da decisão.....</i>	67
3.2	<i>Aplicação numérica em uma região político-administrativa da cidade do Recife (Pernambuco).....</i>	68
3.2.1	<i>Descrição do problema.....</i>	68
3.2.2	<i>Análise hidrológica da inundação com apoio de projeções climáticas.....</i>	69
3.2.3	<i>Estimação das funções consequência e modelagem de preferências do decisor.....</i>	73
3.2.4	<i>Priorização de áreas urbanas com base no risco multidimensional.....</i>	74
3.2.5	<i>Resultados e discussão.....</i>	76
3.3	<i>Síntese do Capítulo.....</i>	84
<b>4</b>	<b>MODELO DE DECISÃO MULTIATRIBUTO NÃO-ESTACIONÁRIO PARA AVALIAÇÃO DE RISCO DE INUNDAÇÃO URBANA COM O NSMAUT.....</b>	<b>87</b>
4.1	<i>Estrutura do NSMAUT: um novo método baseado em utilidade esperada dependente do tempo.....</i>	87
4.1.1	<i>Sobre a modelagem da fonte de perigo.....</i>	89
4.1.2	<i>Sobre a dinâmica das consequências.....</i>	93
4.1.3	<i>Sobre a elicitación de preferências dependente do tempo.....</i>	95
4.2	<i>Aplicação numérica em uma região político-administrativa da cidade do Recife (Pernambuco).....</i>	100
4.2.1	<i>Descrição do contexto de aplicação.....</i>	100
4.2.2	<i>Resultados e discussão.....</i>	106
4.3	<i>Síntese do Capítulo.....</i>	108
<b>5</b>	<b>SISTEMA DE APOIO A DECISÃO PARA GERENCIAMENTO DE RISCOS DE INUNDAÇÕES: A PLATAFORMA COLABORATIVA FLOOD MATTERS.....</b>	<b>110</b>

5.1	Gestão de usuários e importação de dados.....	112
5.2	Elicitação das preferências do decisor.....	114
5.3	Análise de resultados e de sensibilidade com exportação de resultados.....	116
5.4	Integração do modelo NSMAUT no sistema <i>Flood MATTERS</i> .....	117
<b>6</b>	<b>CONCLUSÕES E DIRECIONAMENTOS PARA TRABALHOS FUTUROS.....</b>	<b>120</b>
6.1	Considerações Finais.....	120
6.2	Impacto Gerencial e Limitações encontradas.....	121
6.3	Sugestões para Trabalhos Futuros.....	123
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>125</b>
	<b>APÊNDICE A – NOTAÇÕES MATEMÁTICAS.....</b>	<b>137</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Ao longo das décadas, a complexa interrelação entre os seres humanos e a natureza tem levado as sociedades urbanas a buscar uma ampla agenda de desenvolvimento sustentável para combater os efeitos do aquecimento global e do crescimento populacional. De fato, isto configura um aspecto chave para as futuras gerações, de modo que precisa ser gerenciado por profissionais de diferentes áreas do conhecimento a fim de promover uma adaptação estratégica das cidades para desafios futuros, que incluem não apenas questões ambientais, mas também sociais, financeiras e operacionais (POUR et al., 2020).

Nesse contexto, é importante observar que, para alcançar centros urbanos sustentáveis e com qualidade de vida, uma tomada de decisão a longo prazo deve lidar com variáveis interdependentes, sendo capaz de conciliar recursos ambientais com equidade social e responsabilidade financeira (GEELS et al., 2018). Entre uma variedade de questões a serem superadas, a gestão de riscos de desastres naturais merece destaque pelas autoridades públicas em todo o mundo, pois as projeções sobre mudanças climáticas têm mostrado que eventos extremos estão se tornando mais frequentes e intensos, como relatado pelo Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC, 2021).

Especialmente no contexto hidrológico, a relação entre cidades e o risco de inundações está longe de ser equilibrada. Desde mortes a lesões, disseminação de doenças, perdas monetárias, danos patrimoniais e desabrigos, os impactos das inundações relatadas em todo o mundo reforçam a crescente preocupação de gestores, cientistas, formuladores de políticas públicas, economistas e outros profissionais neste tema (CRED, 2021). Desse modo, a água assume um aspecto dicotômico pois, embora simbolize um elemento histórico de prosperidade e um fator propulsor no desenvolvimento desde as comunidades primitivas, ela também representa um meio deflagrador de múltiplos efeitos adversos na sociedade.

Em decorrência desses fatores, a gestão de riscos de inundações busca empregar ferramentas diversas para analisar os impactos destes eventos de forma integrada, colocando em evidência as limitações do sistema urbano e os futuros desafios os quais são considerados fundamentais para prevenir danos, reduzir riscos e promover o desenvolvimento urbano sustentável do próximo século (CHITSAZ; BANIHABIB, 2015).

No entanto, é importante pontuar que as políticas utilizadas para mitigar eventos extremos como esse muitas vezes levam em conta múltiplos objetivos que frequentemente conflitam entre si. Por essa razão, as práticas de gestão de risco de inundação devem ser aprimoradas para que diferentes perspectivas sejam levadas em conta em processos decisórios

estratégicos. Assim, deve-se chamar a atenção para as contribuições decorrentes do desenvolvimento e aplicação da abordagem de Apoio a Decisão Multicritério (*Multi-Criteria Decision Making/ Aiding*: MCDM/A) em diversos problemas baseados em risco, perigo e vulnerabilidade no meio urbano (DE BRITO; EVERS, 2016). De acordo com os autores, a modelagem multicritério tem sido usada como base para compor recomendações de decisão significativas para redução e controle dos riscos de inundação, como alocação de recursos, priorização de riscos, localização de estações de emergência, logística humanitária, etc. (DA SILVA et al., 2020; KARAMOUZ et al., 2018; MEJIA-ARGUETA et al., 2018; RIZEEI; PRADHAN; SAHARKHIZ, 2019).

Desse modo, sob uma determinada problemática, a modelagem MCDM/A pode lidar matematicamente com as preferências do decisor para que essas informações possam orientar, de acordo com a racionalidade e estrutura axiomática dos métodos de decisão, a melhor maneira de lidar com as múltiplas perspectivas (DE ALMEIDA et al., 2015). Dessa forma, a subjetividade inserida no processo de decisão deve ser uma importante aliada na resolução do problema posto em questão, desde a estruturação do problema até a elicitação de preferências e avaliação da consistência nas recomendações proferidas por essa abordagem.

Nesse sentido, as informações preferenciais do decisor estabelecem julgamentos de valor quanto à relação entre a fonte de risco que causa inundações e suas potenciais consequências, especialmente em problemas baseados em riscos. Portanto, o benefício da aplicação MCDM/A no contexto de inundações compreende o potencial em coletar diferentes perspectivas de risco utilizando diferentes atributos (dimensões ou critérios) e também informações subjetivas para alcançar avanços significativos e estabelecer diretrizes sólidas para a adaptação dos sistemas urbanos por meio de soluções de compromisso (DA SILVA; ALENCAR; DE ALMEIDA, 2020; DE BRITO; EVERS, 2016).

Entretanto, o caráter de incerteza envolvido na interação do fenômeno hidrológico com o ambiente urbano precisa ser adequadamente considerado em problemas usuais, uma vez que as inundações se comportam como eventos não controlados pelo ser humano. Isso, somado a outros aspectos, como a presença de múltiplos stakeholders, escassez de informações técnicas, diferentes *trade-offs* e falta de indicadores objetivos e plausíveis de risco, contribuem para tornar esse tema um tanto relevante e desafiador, a fim de que haja credibilidade na recomendação e implementação de ações mitigadoras com o uso de modelos de decisão.

Nessa seara, de Almeida et al. (2017) mostraram que poucos métodos utilizam uma abordagem probabilística para modelar tanto o comportamento das inundações quanto suas

consequências nas áreas urbanas, com destaque àqueles baseados na Teoria da Utilidade Esperada (*Expected-Utility*: EU) e os seus desdobramentos (KEENEY; RAIFFA, 1976; WAKKER, 2010).

Particularmente neste trabalho, o foco de atenção é voltado para a proposição, o desenvolvimento e a aplicação de modelos de risco que lidam matematicamente com aspectos probabilísticos inerentes à análise de risco de inundação, concebidos à luz da estrutura axiomática da Teoria da Utilidade Multi-Atributo (*Multi-Attribute Utility Theory*: MAUT). Assim, os modelos a serem apresentados visam contribuir para uma avaliação e priorização multidimensional de riscos de inundação em áreas urbanas. Os modelos consideram os efeitos adversos das inundações, em meio às mudanças climáticas, sob a ótica de cinco dimensões de perda: ambiental/sanitária, econômica, humana, de mobilidade e social.

Para tanto, as contribuições deste trabalho são agrupadas em duas frentes de pesquisa, justificadas de acordo com o tratamento espaço-temporal empregado pelos modelos para avaliar os riscos desse evento extremo. Sob um ponto de vista estacionário, foram concebidos dois modelos georreferenciados baseados no MAUT e na Análise da Decisão para priorização de riscos de inundação sujeito aos efeitos atuais e futuros das mudanças climáticas conforme projeções do IPCC (DA SILVA et al., 2020; DA SILVA; ALENCAR; DE ALMEIDA, 2022a). Ambos assumem como suposição subjacente que a variação temporal do fenômeno hidrológico não possui correlação significativa, sob o ponto de vista estatístico, com os seus impactos e posterior criticidade de riscos.

Em contraponto a isto, um novo método multicritério, intitulado Teoria da Utilidade Multi-Atributo Não-Estacionária (*Non-Stationary Multi-Attribute Utility Theory*: NSMAUT), foi estruturado para inserir a dependência temporal à modelagem baseada em EU no MAUT tradicional. Assim, a modelagem temporal de preferências ajusta dinamicamente o comportamento de risco do decisor ao longo do tempo. Nela, são combinadas variações estatisticamente significativas dos efeitos climáticos e de crescimento populacional com o fenômeno da impaciência que o decisor apresenta ao julgar, em termos de utilidade, sua preferência pelo recebimento de consequências em um estado futuro (BAUCELLS; HEUKAMP, 2012). Cabe ressaltar, no entanto, que embora este modelo de risco generalize as suposições previamente estabelecidas, ele não invalida os pressupostos e a aplicabilidade os modelos anteriores.

É importante observar que todos os modelos propostos neste trabalho foram estruturados de maneira flexível, sendo assim potencialmente replicáveis em qualquer área urbana, de acordo com suas particularidades. Integrados em um Sistema de Apoio a Decisão

(SAD) desenvolvido como produto tecnológico desta tese, tais abordagens de decisão baseadas em risco apresentam propostas alternativas e complementares para uma contínua melhoria das práticas de gestão, o que inclui permitir que o decisor acesse uma ampla gama de informações para tomar decisões críveis e eficazes na prevenção e mitigação de riscos e desastres hidrológicos.

### 1.1 Justificativa e Relevância

Conforme as estatísticas do repositório de dados da companhia alemã Munich Re, as inundações perfazem cerca de 40% de todas as catástrofes naturais relacionadas com perdas, afetando aproximadamente 115 milhões de pessoas, além de casas, propriedades e infraestruturas cujos custos de reparo e manutenção ultrapassam a ordem de 1 trilhão de dólares (MUNICH RE, 2021). Dessa forma, é de se esperar que os eventos extremos, com destaque às inundações, tendem a ser um dos perigos mais recorrentes que perturbam os sistemas urbanos neste século (CRED, 2021).

Nesse sentido, a justificativa basilar para desenvolvimento deste estudo encontra-se apoiada à necessidade de investigar a interação entre questões climáticas e socioeconômicas com frequência/ intensidade de eventos hidrológicos e seus impactos nocivos, sendo um campo de oportunidade para que os avanços metodológicos deste trabalho contribuam efetivamente para a redução de riscos climáticos (WOETZEL et al., 2020). De acordo com o sexto relatório especial do IPCC, a variabilidade no clima de até 1,5 °C é suficiente para que os modelos climáticos projetem, ao nível de significância médio de 5%, registros frequentes de precipitações intensas que são robustamente maiores do que os padrões de chuva atual em diversas regiões do mundo (IPCC, 2021).

Consequentemente, a relevância do trabalho pode ser destacada pela atenção que os efeitos climáticos e seus desdobramentos têm despertado na comunidade científica, na esfera política e na sociedade civil internacionais e nacionais, a exemplo da 26ª Conferência das Nações Unidas sobre as Mudanças Climáticas – COP26 (OMS, 2021). Sendo assim, entre os principais desafios para as futuras gerações, está o redirecionamento de esforços para adaptação climática dos centros urbanos, não se limitando apenas à redução de impactos humanos e econômicos. Estudos recentes como Alderman, Turner & Tong (2012) e Han & He (2021) têm apontado uma significativa correlação dos efeitos das inundações na saúde pública, com evidências epidemiológicas de surtos de doenças decorrentes de eventos extremos, incluindo doenças pós-traumáticas (mentais e físicas) e o agravamento da pandemia do COVID-19, ainda vigente na sociedade global. Já Priori, Alencar & de Almeida (2017)

revelam um ponto de vista diferente ao observar como os eventos hidrológicos podem minar as infraestruturas críticas de centros urbanos, como o fornecimento de energia, logística, transporte, comunicações e drenagem.

Além disso, o relatório sobre o clima destaca que as projeções populacionais devem aumentar de modo que cerca de 80% das pessoas viverão em espaços urbanos até 2050, agravando assim a pobreza e a desigualdade socioeconômica (ONU, 2019). Entretanto, alguns estudos já reforçam as implicações da urbanização não planejada na dinâmica dos desastres. Chen & Frauenfeld (2016) por exemplo, analisaram o clima futuro previsto da China e seus impactos relacionados. Eles usaram um modelo para projetar o que o clima da China em 2050 e comprovaram que seria mais seco e mais quente, sugerindo assim a parcela de contribuição da atividade humana para a geração dos efeitos catastróficos. Já Hodgkins et al. (2019) analisaram de forma comparativa tendências históricas nos picos anuais de pico nos Estados Unidos em bacias urbanizadas, cuja análise revelou um aumento significativo do volume e da frequência das inundações em relação as não urbanizadas.

Logo, esse efeito combinado tem potencial para catalisar o número de pessoas e ativos vulneráveis e expostos a esse evento extremo. Isso reforça como os riscos relacionados ao clima podem afetar o crescimento econômico, a disponibilidade de água, a saúde pública e a segurança humana/alimentar; em outras palavras, inundações podem ser um ponto de partida para a ocorrência de danos em cascata (FEM, 2021).

Por essa razão, a análise de riscos se configura como um recurso poderoso a ser explorado pelos setores produtivos, pela Academia, pelas administrações públicas e por outros profissionais para avaliar, interpretar, comunicar e reduzir os riscos de inundação. Especificamente no tocante ao escopo deste trabalho, de Brito & Evers (2016) revelam que, embora os modelos MCDM/A baseados em EU, a exemplo do MAUT, sejam amplamente adequados ao contexto de gestão de inundação, o uso dessas abordagens têm sido negligenciado. Isso ocorre em razão da comum percepção por decisores de que se trata de modelos mais sofisticados que os demais e, por conseguinte, exigem maior esforço e informação para tomada de decisão. Nesse contexto, este trabalho se justifica na busca, à luz dos estudos baseados em EU, por modelos de decisão acessíveis, informativos, robustos e, sobretudo, metodologicamente aceitáveis, superando as limitações impostas pelo contexto do problema.

## 1.2 Objetivos do Trabalho

Este item visa apresentar o objetivo geral e os objetivos específicos deste trabalho.

### 1.2.1 *Objetivo Geral*

O objetivo central deste estudo visa formular modelos de decisão multicritério georreferenciados baseados em utilidade para avaliação de riscos de inundação em espaços urbanos a fim de auxiliar a tomada de decisão estratégica em meio às mudanças climáticas.

### 1.2.2 *Objetivos Específicos*

No entanto, para se alcançar tal objetivo, configuram-se como objetivos específicos:

- Empregar técnicas de previsão de índices climáticos para quantificar o impacto futuro na avaliação de riscos através de modelos climáticos e demográficos;
- Desenvolver na modelagem de risco a forma de agregação multicritério e geração dos riscos globais para ordenação das áreas mais críticas;
- Propor a incorporação da dinâmica temporal na abordagem de elicitação de preferências do decisor por meio do novo método NSMAUT;
- Construir um sistema de apoio a decisão (SAD) para potencializar a implementação dos modelos de risco no ambiente organizacional;
- Explorar ferramentas de georreferenciamento (*Georeferencing Information System: GIS*) e de visualização tabular/ gráfica para aprimorar a comunicação e análise de risco;
- Construir indicadores de desempenho para interpretação e monitoramento do risco de inundações; e
- Investigar a robustez das recomendações feitas pelos modelos mediante variações de fatores climáticos, de exposição, e de atitudes ao risco através de um protocolo estruturado de análise de sensibilidade via Simulação Monte Carlo (SMC).

## 1.3 Estrutura da Tese

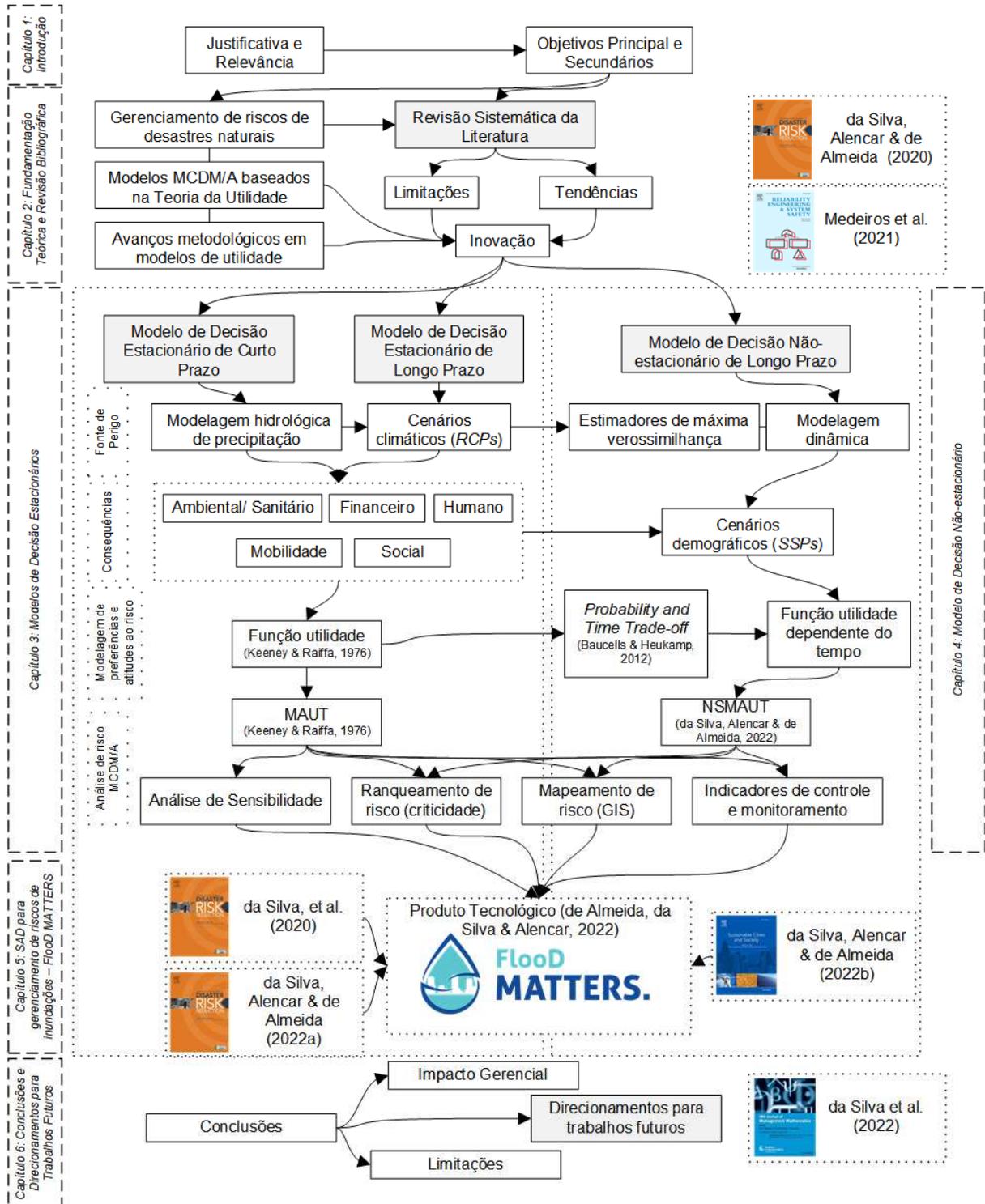
O trabalho está estruturado em 6 capítulos, conforme disposto na Figura 1 e descrito a seguir.

O Capítulo I, a Introdução, apresenta as motivações e justificativas para o desenvolvimento do trabalho, bem como os objetivos geral e específicos do estudo.

O Capítulo II, Fundamentação Teórica e Revisão Bibliográfica, aborda não somente a fundamentação da base conceitual sobre gerenciamento de riscos, mas também a modelagem de risco baseada em EU e seus avanços metodológicos, dentre os quais cabe destacar um subproduto deste trabalho (MEDEIROS et al., 2021). Ainda neste capítulo, o autor também esquematiza uma revisão sistemática da literatura a respeito da modelagem de decisão

baseada em risco para gerenciamento de inundações em meio às mudanças climáticas sob o enfoque multicritério. A partir de contribuições diretas desta tese e presentes na literatura (DA SILVA; ALENCAR; DE ALMEIDA, 2020), a revisão sistemática serviu para mapear o estado da arte, suas limitações e tendências, estabelecer insights a serem explorados pela área de conhecimento e, assim, posicionar o caráter inovador deste trabalho.

Figura 1 – Fluxograma com escopo da tese e seus produtos/ publicações.



Fonte: O Autor (2022).

O capítulo III, Modelos de Decisão Estacionários, detalha passo a passo a metodologia utilizada para usando MAUT e Análise da Decisão, cujas suposições matemáticas são admitidas e o algoritmo explanado passo a passo com auxílio de modelos climáticos e ferramentas estatísticas sob perspectivas atual e futura de risco. Com base nesses modelos alguns trabalhos foram publicados em periódicos (DA SILVA et al., 2020; DA SILVA; ALENCAR; DE ALMEIDA, 2022a). Por meio de uma aplicação numérica em uma região da cidade do Recife (Pernambuco), são apontadas as fronteiras de inovação cobertas pela tese e seus potenciais impactos ambientais, sociais e financeiros para o estado da arte.

O capítulo IV, Modelo de Decisão Não-estacionário, fundamenta os pressupostos básicos do novo método NSMAUT, proposto nesta tese, no qual insere o contexto temporal para avaliação das fontes de perigo, consequências e modelagem de preferências para aprimorar os modelos de risco discutidos no capítulo anterior. Sendo assim, por meio de novos indicadores de monitoramento de risco introduzidos ao leitor, é conduzida uma aplicação numérica para ilustrar e validar a nova abordagem, de acordo com o trabalho recém-publicado em periódico (DA SILVA; ALENCAR; DE ALMEIDA, 2022b).

O capítulo V, SAD para gerenciamento de risco de inundações, o autor aborda a concepção, arquitetura e requisitos funcionais de um produto tecnológico criado como ferramenta na condução do processo decisório com os modelos propostos neste trabalho. Este produto tecnológico se encontra em processo de registro no Instituto Nacional de Propriedade Industrial (INPI) (DE ALMEIDA; DA SILVA; ALENCAR, 2022).

O capítulo VI, Conclusões e Direcionamentos para Trabalhos Futuros, são apresentadas as considerações finais sobre o trabalho, nas quais afirmam as contribuições gerenciais inovadoras para o tema, elenca desafios e pontua algumas limitações a fim de propor sugestões para trabalhos futuros.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo, será apresentada a base conceitual que norteia este trabalho. O item 2.1 trata dos fundamentos de gerenciamento de riscos de desastres naturais com foco em inundações, além da tomada de decisão baseada em utilidade no contexto de riscos. Em seguida, por meio de uma revisão sistemática da literatura, o item 2.2 realiza um mapeamento do estado da arte a respeito da modelagem multicritério para gestão de risco de inundações em meio ao clima, a fim de apontar campos de oportunidade para esta área de pesquisa, compartilhar insights que reforçam o caráter inovador do estudo e posicionar potenciais contribuições.

### 2.1 Fundamentação Teórica

A fundamentação teórica deste trabalho explana os principais conceitos relacionados aos seguintes tópicos: gerenciamento de riscos de inundações, modelagem de decisão baseada em risco com a Teoria da Utilidade (EU) e seus avanços metodológicos.

#### 2.1.1 *Gerenciamento de riscos de desastres naturais: um enfoque nas inundações*

A evolução e aprimoramento das técnicas de gerenciamento de riscos de desastres naturais tem sido adaptado aos novos desafios da sociedade pós-moderna, especialmente devido a mudanças climáticas, alterações no uso e manejo da terra e outras intervenções antrópicas, como crescimento urbano desordenado, erosão devido ao desmatamento, construção de empreendimentos irregulares em corpos d'água e mudanças ou desvios nos seus cursos (GREEN; PARKER; TUNSTALL, 2000). Como consequência, o aumento consistente da vulnerabilidade do sistema urbano frente a ocorrência de eventos extremos – em especial os hidrológicos – revela, em frequência e intensidade, o nível preocupante da extensão de fatalidades, danos em ativos e consequências ambientais (AHMADISHARAF; KALYANAPU; CHUNG, 2015).

Entretanto, faz-se necessário esclarecer a diferença entre alguns termos essenciais para afirmar o contexto abordado por este trabalho. Embora expressões como “alagamento”, “cheia”, “enchente” e “inundação” sejam amplamente usadas no cotidiano e no meio técnico com eventual superposição em suas definições, de fato, representam aspectos hidrológicos distintos (MIGUEZ; GREGORIO; VEROL, 2018). O rigor da interpretação hidrológica implica que os referidos termos possuem nuances próprias, em cujo significado da inundação, enquanto fenômeno potencialmente catastrófico, deve ser individualizado. Logo, de acordo

com o Glossário de Defesa Civil (BRASIL, 2009), a inundação se trata do extravasamento da vazão de rios, mares, lagos e açudes para além de suas calhas normais, ocupando áreas não habitualmente submersas (planície de inundação). Para uma clareza no entendimento deste trabalho, o conceito de inundação se estende também ao acúmulo de consideráveis volumes d'água por drenagem deficiente, conforme (MIGUEZ; GREGORIO; VEROL, 2018). Desse modo, a avaliação de risco – definido classicamente como a combinação da probabilidade de ocorrência, magnitude do evento e suas potenciais consequências – é um aspecto crítico pelo qual os sistemas urbanos buscam estruturar seus planos de adaptação climática (AVEN, 2020).

Nesse sentido, o gerenciamento de riscos de inundação (*Flood Risk Management: FRM*) é um dos principais mecanismos utilizados pelas organizações públicas e privadas para prevenir e combater os impactos desse evento. No entanto, é válido ressaltar que três linhas distintas de atuação, categorizadas a partir da linha do tempo do desastre natural, regem as práticas da FRM, a saber:

- Período pré-desastre, o qual compreende ações de mitigação, alerta e monitoramento constante da probabilidade e extensão do fenômeno, a fim de preparar ativos, propriedades e cidadãos para a ocorrência do desastre em si;
- Período de desastre ou emergência: a inundação desencadeada exige dos órgãos competentes operações céleres de resposta ao evento. Aqui, o desastre atinge o sistema exposto em uma magnitude capaz de causar perdas significativas; e
- Período pós-desastre, quando há um arrefecimento gradual da magnitude do fenômeno com foco no estabelecimento de um plano de recuperação. Este inclui medidas estruturais e não estruturais, que visam restabelecer o ambiente afetado em condições normais.

Cabe ressaltar que o foco deste trabalho se concentra na fase pré-desastre, fundamentando o uso de técnicas práticas, a geração de informações e a disposição de recomendações estratégicas para priorização de medidas de redução de riscos (CASTILLO-RODRÍGUEZ et al., 2014). Portanto, a FRM moderna deve unir seus esforços na proposição de ferramentas que auxiliem gestores governamentais e stakeholders a estabelecer instrumentos legais, econômicos, sociais e sustentáveis de planos de ação, emergência, contingência e de gestão de desastres (AKTER et al., 2018).

Sob essa perspectiva, existem diferentes abordagens tradicionalmente usadas para ajudar entidades públicas e privadas a estimar e mitigar riscos de inundações de forma razoável. A análise de custo-benefício, por exemplo, compreende uma técnica econômica

tradicional que avalia de forma holística se os benefícios esperados com a implementação de uma ação de redução de riscos superam seus custos. Em contraponto, Samuels e Gouldby (2009) criticam em seu trabalho a quantificação de riscos em termos monetários e posterior agregação em um único valor, pois isso impossibilita a associação de fatores de diferentes naturezas que também são afetados pelo risco. Além disso, elementos da Teoria da Decisão também são utilizados para avaliação de riscos de inundações (CUELLAR; MCKINNEY, 2017), assim como as metodologias de análise hidro meteorológica que visam a análise contínua de parâmetros e aspectos físicos, hidrológicos, topográficos, climáticos e geológicos para tomada de decisão (PATRA; KUMAR; MANI, 2016).

Independentemente das metodologias utilizadas para resolver esse problema emergente, todas elas admitem como suposição básica de que o regime pluviométrico é o fator crítico para a incidência de inundações. Deve-se observar, entretanto, que a chuva em si não representa perigo, mas a forma como este fenômeno afeta as bacias hidrográficas, sendo transformado em vazão, é a fonte de preocupação. Então, o ponto central a ser avaliado pela abordagem de decisão baseada em risco é como as questões climáticas, ambientais, físicas e antrópicas afetam os níveis de gravidade das inundações que, por conseguinte, perturbam o funcionamento pleno dos espaços urbanos.

Em meio a um ambiente multifacetado, pesquisadores, gestores, e profissionais das comunidades científica e civil têm dado atenção especial ao emprego de ferramentas MCDM/A para gerenciamento de riscos, a fim de inserir preferências subjetivas do decisor para lidar com os múltiplos aspectos a serem considerados simultaneamente (DE ALMEIDA et al., 2017).

Particularmente no contexto brasileiro, faz-se necessário pontuar que a gestão integral do risco de desastres compreende um conjunto de políticas públicas nas esferas municipal, estadual e/ou federal que mobiliza recursos, processos, capacidades, atores e responsabilidades necessários para uma concreta redução de consequências adversas no tempo e no espaço (CASTILLO-RODRÍGUEZ et al., 2014). Logo, este tema é transversal e não deve ser tratado apenas no âmbito de ações de defesa civil, ainda mais em virtude das metas estratégicas de redução de desastres urbanos apontados pelo IPCC (2021), que incluem (i) a redução de índices de mortalidade, número de pessoas afetadas e perdas econômicas; (ii) aumento de disponibilidade e acesso a sistemas de alerta; e (iii) promoção da cooperação nacional/ internacional e suporte emergencial a comunidades com adoção de estratégias de adaptação climática.

Nessa seara, é importante observar que a modelagem de risco está sujeita a fatores hidrológicos sob os quais o ser humano não tem controle. Por isso, não é trivial estabelecer uma relação de causa e efeito a partir de eventos extremos. Como resultado, um plano de combate ao risco surge a partir das atitudes que o gestor público possui, enquanto decisor, uma vez que não tem informações perfeitas e os resultados futuros estão sujeitos a incerteza. Assim, acidentes passados e seus resultados prejudiciais na indústria e na Natureza motivam os gestores a lidar com incertezas e riscos adequadamente.

Diante desse cenário, os estudiosos vêm colocando seus esforços para melhorar os modelos MCDM/A baseados em utilidades, com vistas a incluir as atitudes comportamentais do decisor na análise de riscos devido à incerteza. Isso também contribui para a mudança das práticas conservadoras comuns na avaliação de riscos; Aven (2016) afirma que muitas organizações devem evitá-las para alcançar condições de segurança adequadas. A seguir, o item 2.1.2 detalha a evolução desta abordagem para o contexto em análise.

### 2.1.2 Modelagem de decisão MCDM/A baseados em risco com a Teoria da Utilidade

A Teoria da Utilidade Esperada (EU) clássica proposta por von Neumann e Morgenstern no século passado teve um grande impacto no pensamento econômico, de modo que suas ideias encorajaram pesquisadores a levantarem reflexões importantes em diferentes contextos (FISHBURN, 1989). Ao longo das décadas, os procedimentos de elicitación de preferências têm sido utilizados para modelar atitudes de risco por meio de loterias ou prospectos, e têm sido aplicados em decisões sociais, econômicas e tecnológicas. Formalmente, um prospecto  $[x; p]$  mapeia as possíveis consequências (estados reais) de um evento,  $x$ , que resultarão sob uma probabilidade de ocorrência ( $p$ ). Esta abordagem é sustentada por quatro axiomas plausíveis que justificam a hipótese EU. Para tanto, sejam A, B e C as consequências; P e I as relações binárias de preferência estrita e indiferença; e sejam  $p$ ,  $q$  probabilidades de modo que  $0 < q < p < 1$ . Seguindo a EU, o decisor deve obedecer (DE ALMEIDA et al., 2015):

- Axioma da completude ou ordenabilidade:  $A P B$  ou  $A I B$  ou  $B I A$ ;
- Axioma da transitividade: se  $A P B$  e  $B P C \Rightarrow A P C$ ; se  $A I B$  e  $B I C \Rightarrow A I C$ ;
- Axioma arquimediano: se  $A P B$ , então  $\exists p, q$  tais que  $[A, p; C] P B P [A, q; C]$ ; e
- Axioma da independência: se  $A P B$ , então  $\exists p$  tal que  $\forall C: [A, p; C] P [B, p; C]$ .

Uma vez satisfeitas, existe uma função utilidade  $u(x)$  que representa adequadamente as preferências do decisor, de acordo com as propriedades básicas de linearidade nas

probabilidades e separabilidade aditiva que, por conseguinte, implicam nas propriedades de razão comum e consequência comum (DE ALMEIDA et al., 2015).

Apesar da maioria das análises de risco com a EU ainda considerar apenas uma dimensão em particular (BEHESHTIAN et al., 2018; KIND; WOUTER BOTZEN; AERTS, 2017), algumas abordagens MCDM/A têm utilizado o MAUT para avaliar e analisar, sob uma perspectiva multicritério, o risco no contexto de riscos naturais (LIU et al., 2018a), manutenção (STIPANOVIC et al., 2021), além da operação em gasodutos de gás natural (BRITO; DE ALMEIDA, 2009) e dutos de esgoto (KADDOURA; ZAYED; HAWARI, 2018), por exemplo.

Keeney & Raiffa (1976) estruturam, com o MAUT, uma forma de agregação adequada às preferências multiatributo do decisor, a depender de seu comportamento às condições de independência em utilidade e aditiva. A partir de perguntas referentes a loterias hipotéticas, os autores propuseram um procedimento com protocolo claro e fundamentado a fim de avaliar a compensação entre os critérios por meio das constantes de escala,  $k$ . A equação 1 ilustra a forma de agregação linear e aditiva da função utilidade multiatributo, válida com o atendimento às condições supracitadas, para dois critérios ditos  $x$  e  $y$ .

$$u(x, y) = k_x u(x) + k_y u(y) \quad (1)$$

Particularmente em relação ao método MAUT, embora existam estudos precursores na integração da abordagem MCDM/A com a gestão e análise de riscos, a revisão sistemática esquematizada no item 2.2 revela que os estudos ainda são incipientes, o que evidencia uma lacuna na literatura no que diz respeito à inserção de uma abordagem probabilística na modelagem de risco multiatributo. Cabe esclarecer ao leitor que este trabalho fará uso, a partir de então, do termo “multiatributo” para designar a área de conhecimento em MCDM/A na qual múltiplos critérios ou dimensões são modeladas sob incerteza. Desse modo, alguns estudos no tema justificam a relevância no uso desse método em diferentes aplicações por apresentar uma estrutura axiomática sólida que permite ser adaptada ao contexto de risco (ALENCAR; DE ALMEIDA, 2015; DE ALMEIDA et al., 2017; MEDEIROS; ALENCAR; DE ALMEIDA, 2016, 2017).

Especialmente no contexto da FRM, Loos & Rogers (2016) usaram a Teoria EU para estimar a vulnerabilidade à inundação em uma área urbana usando MAUT. A aplicação de uma função de utilidade destacou o papel dos julgamentos de valor individuais de um decisor na priorização dos resultados de decisão, ilustrando assim porque uma alternativa pode ser uma escolha melhor do que outra. Já Meyer, Scheuer & Haase (2009) revelam como o MAUT pode ser incorporado a técnicas como o georreferenciamento para compor abordagens

disjuntivas, a fim de avaliar e mapear riscos de inundação, no que diz respeito a critérios econômicos, sociais e ambientais. Sendo assim, embora projetar uma análise multiatributo prática seja bastante desafiador e muitas vezes requer um volume intensivo de dados, as propostas de modelagem apresentadas nesta tese partem de uma análise probabilística com a Análise da Decisão, utilizando julgamentos sobre perdas (riscos), e não apenas sobre ganhos (utilidades), para apoiar decisões estratégicas para combate a inundação em meio às mudanças climáticas. Isso será explanado de maneira detalhada no capítulo 3.

Por outro lado, Zio (2018) afirma que estimar as fontes de risco e suas consequências está sujeito a incertezas inerentes, de modo que, ao descrever e modelar os efeitos das mudanças climáticas, a recomendação para decisão pode sofrer variações consideráveis, fato este que pode afetar a interpretação dos resultados de métodos quantitativos, a exemplo do MAUT. Os estudos de Aven & Renn (2015), por exemplo, demonstram, à luz das projeções do IPCC, como a falta de precisão em delinear os conceitos de risco e incerteza pode prejudicar a forma como as decisões são tratadas. Além disso, Aven (2019) defende que duas questões sejam abordadas ao abordar os riscos das mudanças climáticas: (i) a associação entre valores e riscos esperados; e (ii) a força da avaliação do conhecimento. Suas conclusões revelam que uma modelagem adequada entre risco climático, incerteza e conhecimento pode melhorar os processos de análise de risco, o que inclui detectar potenciais eventos "surpreendentes", isto é, cujas consequências, embora raras, sejam bastante relevantes. Logo, a avaliação de riscos de inundações com MAUT, para considerar a interação climática na relação causa e efeito nos espaços urbanos, deve incorporar o tratamento de risco e incerteza, especificamente ao estimar parâmetros das consequências, elicitando as utilidades e as constantes de escala, pois são parâmetros essenciais para a agregação de riscos MCDM/A.

Além disso, a abordagem clássica do MAUT não leva em conta uma análise temporal detalhada das consequências futuras, o que reforça a necessidade de investigar cuidadosamente como uma modelagem baseada em utilidade não estacionária pode aprimorar metodologicamente as práticas de FRM sem gerar incerteza adicional na análise de risco, como extensamente comentado por Serinaldi & Kilsby (2015). Assim, o próximo item baseia-se nas principais referências usadas para investigar o estado da arte quanto aos avanços metodológicos em utilidade, e suas discussões adicionais nos levam a inferir que o tema da priorização multiatributo de riscos de inundação que insere a dependência temporal também não foi significativamente abordado antes.

### 2.1.3 Avanços metodológicos em utilidade: os desvios de linearidade quanto a probabilidade e tempo

É importante pontuar que estudos experimentais neste campo revelaram duas questões que precisam ser cuidadosamente abordadas na modelagem de preferências baseadas em utilidade: a existência de desvios psicológicos induzidas por riscos (probabilidade) e atrasos (tempo) quando o decisor estabelece julgamentos sobre consequências. A primeira questão está relacionada com a suposição subjacente da EU, que assume preferências lineares em julgamentos de probabilidade, conforme descrito na seção 2.1.2. Sob essa perspectiva, Allais (1953) demonstrou empiricamente que os indivíduos podem estabelecer decisões inconsistentes ao empregar valores esperados de utilidade, mostrando que os indivíduos tendem a dar maior importância a prospectos quando estão envolvidas consequências extremas. Os resultados de seu estudo, ou seja, o paradoxo de Allais, chamam a atenção para a possibilidade de indivíduos violarem suposições comportamentais da EU, incluindo o axioma da independência. Isso encorajou a evolução de modelos baseados em utilidade não esperada (*non-Expected Utility*: non-EU) que modelam, com uso da função de ponderação  $w(p)$ , a não linearidade das atitudes do decisor ao risco. Como exemplo, pode-se citar os avanços com a utilidade dependente de rank (*Rank-Dependent-Utility*: RDU) e a Teoria do Prospecto Cumulativa (*Cumulative Prospect Theory*: CPT) (WAKKER, 2010).

Nesse sentido, é válido mencionar que se trata de um tema emergente na modelagem de riscos, de modo que Medeiros et al. (2021) evidenciaram uma escassez de trabalhos que abordam a Teoria non-EU em uma perspectiva multidimensional. Enquanto objeto de estudo preliminar para a proposição desta tese, tais autores investigaram como a identificação e modelagem de desvios de linearidade quanto à probabilidade podem contribuir significativamente para a assertividade das decisões a partir da proposição de um método multiatributo com RDU na gestão de gasodutos de gás natural. Em contraponto aos avanços já obtidos com Medeiros et al. (2021), este trabalho se baseia em procedimentos formais de estudos experimentais para justificar o uso adequado da EU no contexto da FRM sem distorcer a análise de risco; porém, esta tese redireciona o foco de investigação para a segunda questão: a consistência temporal das preferências do decisor.

De fato, estudos iniciais como o de Prelec & Loewenstein (1991) já apontavam não somente a relação entre a escolha de consequências arriscadas e o tempo, como também suas implicações para a tomada de decisão. Apoiados por experimentos comportamentais como esquematizado em Abdellaoui et al. (2011) e Zauberman et al. (2009), os autores buscaram

modelar a função da distância psicológica – em termos de probabilidade e tempo –, que representa o grau em que as pessoas se sentem distantes das escolhas de um prospecto. Na prática, o foco é centrado no desconto de tempo em si em vez da preferência temporal, como afirma Frederick et al. (2002). Os autores afirmam que, ao considerar diferentes fatores para se preferir menos um resultado futuro, estes diminuem o valor esperado de utilidade gerado por essa consequência. Andreoni & Sprenger (2012) afirmam que os indivíduos tendem a escolher uma consequência certa quando ela está disponível, mas sob incerteza, agem em grande parte como maximizadores da EU descontados de atrasos no recebimento dessas consequências.

Desse modo, a função utilidade baseada no tempo tem sido formulada a partir da observação de muitos efeitos observados em escolhas reais entre prospectos, com o objetivo de melhorar *trade-offs* e a elicitación de preferências sob situação de risco. Assim, busca-se superar as violações das teorias normativas na literatura, acomodando esses efeitos e generalizando a abordagem das preferências lineares e não lineares (RAMBAUD; FERNÁNDEZ, 2019). Consequentemente, diferentes procedimentos de elicitación e *trade-offs* foram propostos a fim de considerar o desconto de tempo, no qual casos específicos poderiam ser aplicados à EU (BIAŁASZEK; MARCOWSKI; COX, 2020; GERBER; ROHDE, 2015, 2018).

Faz-se necessário esclarecer que, apesar de não ser o foco desta seção comparar diferentes procedimentos, é essencial estabelecer uma breve visão geral de seus benefícios e limitações para fundamentar a proposição de avanços importantes em uma tomada de decisão crível e dependente do tempo, discutidos mais especificamente no capítulo 4. À luz da econofísica e neuroeconomia, Takahashi et al. (2008) fizeram uma análise comparativa de várias funções de desconto para escolhas temporais e sugeriram algumas regras de decisão para escolher a melhor. Attema et al. (2010) propuseram o procedimento de elicitación intitulado *Time Trade-Off* (TTO) e evidenciaram que algumas inconsistências quanto à linearidade sobre o tempo decorrem principalmente pelo aumento da impaciência dos decisores no que diz respeito ao consumo de prospectos atrasados. Apesar de os autores não assumirem nenhuma forma previamente estabelecida das funções de desconto, eles notam que certas funções populares mantêm tais inconsistências e, por esta razão pedem cautela no uso e encorajam o desenvolvimento de novas formulações matemáticas.

De modo geral, Gerber & Rohde (2018) comentam que, a partir das suposições que envolvem a aplicação desses procedimentos de elicitación, eles diferem uns dos outros de acordo com a relação de três parâmetros-chave de tempo durante o processo de tomada de

decisão, ou seja: (i) o tempo de decisão ( $t_d$ ); (ii) o tempo de consumo ( $t_c$ ), o tempo em que a consequência é recebida; e (iii) o tempo de resolução ( $t_r$ ), o instante em que a incerteza associada às consequências é estimada. Dentre os diversos procedimentos de elicitación de preferências dependentes do tempo, este trabalho destaca o procedimento *Probability and Time Trade-off* (PTT) proposto por Baucells & Heukamp (2012). Esse procedimento indica que análise de risco será conduzida de modo que o tempo de decisão seja fixo e apenas o tempo de consumo do prospecto possa variar (para  $t_c = t_r$ ). O PTT foi escolhido por ser um processo parcimonioso, com elicitación livre de parâmetros e de estrutura axiomática simples, porém forte, no sentido de que as preferências intertemporais sejam analisadas sob independência multiplicativa. Como esquematizado na equação 2, uma função de referência evidenciou o caso em que a magnitude esperada da utilidade com desconto esperado de magnitude é um caso particular de PTT, ou seja,  $w(p) = p$  (preferências lineares).

$$u([x, p, t]) \cong E([x, p, t]) = pe^{-r_x t} u(x) \quad (2)$$

Aqui, denotamos  $[x, p, t]$  um prospecto com probabilidade  $p$  de receber uma consequência  $x$  no momento  $t$ ; caso contrário, o pior resultado possível ( $x_w$ ) será obtido. Além disso, o termo  $e^{-r_x t}$  ajusta a percepção do decisor em relação aos atrasos, estando o coeficiente  $r_x$  intimamente relacionado à dependência da magnitude em  $x$ . Uma descrição detalhada do processo de elicitación pode ser verificada no capítulo 4. Como outra razão que incentiva esta pesquisa a incorporar o PTT, o procedimento é geral o suficiente para descrever decisões intertemporais e arriscadas separadamente (RAMBAUD; PÉREZ, 2020).

Em meio ao contexto de FRM, a priorização de riscos urbanos, que implicam ações públicas para reduzir e evitar seus impactos, são dinâmicas de modo que os recursos financeiros, humanos e operacionais têm o potencial de serem adequadamente gerenciados se a modelagem de risco seguir uma perspectiva não estacionária. Nela, há a possibilidade de mudar a forma como o decisor afirma suas preferências em diferentes períodos sob consequências danosas.

Apesar da abordagem temporal ser amplamente discutida em estudos financeiros, poucos modelos de utilidades dependentes do tempo têm sido aplicados em situações de emergência e de FRM (REYNAUD; AUBERT, 2020; TAHERI; WANG, 2018), o que significa que este é um campo de oportunidade a ser explorado pela área. Entre estudos recentes, Šraj et al. (2016) evidenciaram como a estacionariedade pode subestimar os quantis de inundação em relação aos modelos dinâmicos, o que limitam o uso de seus resultados para a adoção de ações estratégicas a longo prazo. Com o auxílio da modelagem hidrológica,

geralmente adotada pelos órgãos de monitoramento de inundações, os autores mostram que é possível estabelecer uma relação matemática com o aumento da precipitação aos níveis de inundação, o que afeta a ordenação de risco para fins de mitigação.

Sendo assim, a partir de uma análise abrangente das referências acima discutidas, é razoável concluir que o uso de utilidades temporais para avaliação de problemas de risco MCDM/A não foi, até então, significativamente abordado. O capítulo 4 busca preencher essa lacuna, introduzindo então um avanço metodológico relevante nos modelos de risco MCDM/A atuais. A seguir, a seção 2.2 reforça o caráter inovador do presente estudo, ao retratar por meio de uma revisão sistemática as limitações, oportunidades e desafios para a gestão de riscos de inundações em meio às mudanças climáticas usando a abordagem multicritério.

## 2.2 Revisão Bibliográfica sobre modelagem de decisão multidimensional baseada em risco para gerenciamento de inundações em meio aos efeitos climáticos

Nesta seção, será apresentada uma revisão sistemática da literatura sobre as práticas de gerenciamento de risco de inundações em meio às mudanças climáticas com o uso de abordagem MCDM/A. Com isso, pretende-se fazer um mapeamento do estado da arte sobre os estudos centrais que orientam o posicionamento deste trabalho.

### 2.2.1 Perguntas motivadoras e apresentação do protocolo de pesquisa

A fundamentação teórica abordada no item anterior revela uma preocupação crescente de diversos representantes da sociedade com novos problemas de decisão que devem ser enfrentados pelos centros urbanos a fim de mitigar os efeitos potencialmente devastadores das inundações. Desse modo, faz-se necessário analisar os recentes avanços na literatura, a fim de balizar a construção e o desenvolvimento de modelos de decisão que considerem múltiplas dimensões simultaneamente, sob impacto dos eventos hidrológicos agravados pelas mudanças climáticas.

Nesse sentido, este item pretende explorar, à luz das perguntas de pesquisa relacionadas abaixo, como as limitações e desafios no tema são capazes de reforçar o caráter inovativo e as contribuições metodológica e prática desta tese. Estas questões representam reflexões estratégicas cujo panorama atual embasa a proposição dos modelos de decisão discutidos neste trabalho e pode auxiliar diversos profissionais a aprimorar o combate aos efeitos climáticos na gestão de riscos de inundações. As perguntas estão dispostas abaixo, a saber:

- P1. Quais métodos MCDM/A e problemas típicos de decisão são usualmente empregados para enfrentar o efeito climático em FRM?
- P2. Como os recentes trabalhos modelam matematicamente os impactos das mudanças climáticas sobre os problemas de FRM?
- P3. Como as ferramentas de georreferenciamento contribuem para aprimorar o processo decisório e, assim, mitigar os efeitos climáticos?
- P4. Quais critérios, indicadores, medidas e outros parâmetros são levados em conta na tomada de decisão em FRM?
- P5. Como a falta de dados e a limitação de *expertise* levam à necessidade de considerar a incerteza na estruturação de problemas na FRM?

Desse modo, a necessidade de se obter respostas úteis às reflexões supracitadas motivou este trabalho a identificar e examinar de forma sistemática trabalhos publicados na literatura sobre o tema. Para tanto, este item introduz o protocolo Revisão Sistemática da Literatura (RSL) proposto por Kitchenham et al. (2009) para investigar evidências relacionadas a uma estratégia de intervenção específica, aplicando métodos de busca explícitos e sistemáticos, com avaliação crítica e síntese das informações selecionadas. Cabe destacar que esta RSL reforça e atualiza as principais contribuições oriundas de da Silva, Alencar & de Almeida (2020), enquanto produto parcial desta tese. A seguir, o item 2.2.2 detalha, em termos gerais, a metodologia para a revisão bibliográfica acerca do tema em estudo.

### 2.2.2 Metodologia para revisão sistemática da literatura (RSL)

Com base no exposto anteriormente, é importante pontuar que, apesar da RSL e da análise bibliométrica terem sido frequentemente utilizadas em diversos campos para detectar padrões, tendências e lacunas de pesquisa, este item se propõe a condensar informações importantes de pesquisas recentes sobre o tema em estudo, cujas questões críticas – a exemplo daquelas retratadas nas perguntas motivadoras – têm forte impacto no processo decisório. Há certamente uma carência da literatura em mapear as pesquisas vigentes na área.

Como resultado, um panorama claro dos avanços, gargalos e insights para a FRM põe foco na integração de tópicos essenciais para fomentar a colaboração entre cientistas, sociedade civil e instituições para financiamento futuro e sobre o planejamento da melhor forma de enfrentar o desafio globalmente urgente de gerenciar desastres provocados pela variabilidade climática.

Por isso, foi realizada uma revisão estruturada e sistemática da literatura, com o objetivo de detectar artigos revisados por pares que apliquem metodologias MCDM/A na gestão de

riscos de inundação devido às mudanças climáticas. A RSL é replicável e se esforça para reduzir vieses quando comparados às revisões narrativas e baseadas em meta-análises tradicionais.

Para fins didáticos, a metodologia foi dividida em 4 passos, conforme descrito sucintamente abaixo:

- Etapa 1 – Base de dados e estratégica de pesquisa

À luz das questões levantadas no item 2.2.1, o escopo que delineou esta RSL busca analisar características intimamente associadas ao processo de tomada de decisão para estabelecer diretrizes para modelagem de decisões típicas neste contexto, mapeando: problemas de decisão usuais; tipos de métodos empregados; uso de ferramentas de georreferenciamento (GIS); tratamento de incertezas; integração com modelos hidrodinâmicos, disponibilidade de dados; uso de técnicas de modelagem climática; existência de critérios/indicadores; uso de procedimentos para elicitación de pesos; e modelagem das alternativas.

Além disso, esta RSL busca analisar, de forma especial, abordagens MCDM/A que tratam de aspectos subjetivos (preferências) para a tomada de decisão, uma vez que é difícil e complexo para o decisor estabelecer *trade-offs* entre as diversas dimensões impactadas pelos efeitos climáticos na FRM. É por isso que artigos que usam métodos de otimização puramente multiobjetivos são descartados na construção do escopo geral. Como consequência, as estratégias de busca se resumem a combinação de dois conjuntos de palavras-chave, como pode ser observado na Tabela 1.

Aqui, a estratégia inicial de pesquisa é o ponto de partida para selecionar e compilar potenciais artigos de duas bases de dados principais, até dezembro de 2021: *Scopus (Elsevier)* e *Web of Science (Clarivate Analytics)*. Ambas as fontes são cientificamente relevantes e englobam vários campos de conhecimento que permitem que estudos consistentes dentro do escopo delimitado sejam selecionados. Assim, foram encontrados 832 artigos elegíveis. Após a obtenção dos artigos preliminares, estes foram examinados de acordo com seu conteúdo. Vale ressaltar que não foram consideradas publicações como dissertações e teses, capítulos de livros, relatórios e anais de congresso. Além disso, apenas trabalhos escritos em inglês foram incluídos.

Tabela 1 – Conjunto combinado de palavras-chave, utilizado para compor a estratégia inicial da RSL

Abordagem MCDM/A	Gestão de inundações	Mudança climática
<i>“Bi-criteri*”; “Multi-attribute”; “Multi-criteri*”; “multi-dimensio*”; “Multiple-Attribute”; “Multiple-Criteri*”; “multiple-dimensio*”; ELECTRE; MAU; MAUT; MAVT; MCDA; MCDM; MCDA/M; MCDM/A; MDM; Multiattribute; Multicriteri*; multidimensio*; PROMETHEE; SMART*; TOPSIS; TODIM; AHP.</i>	<i>“Flood*”; “flooding”; “precipitation”; “inundation”.</i>	<i>“Climate change*”; “change climatic*”; “climate effect*”; “climate variability”; “climate model*”; “climate sensitivity”; “climate”.</i>

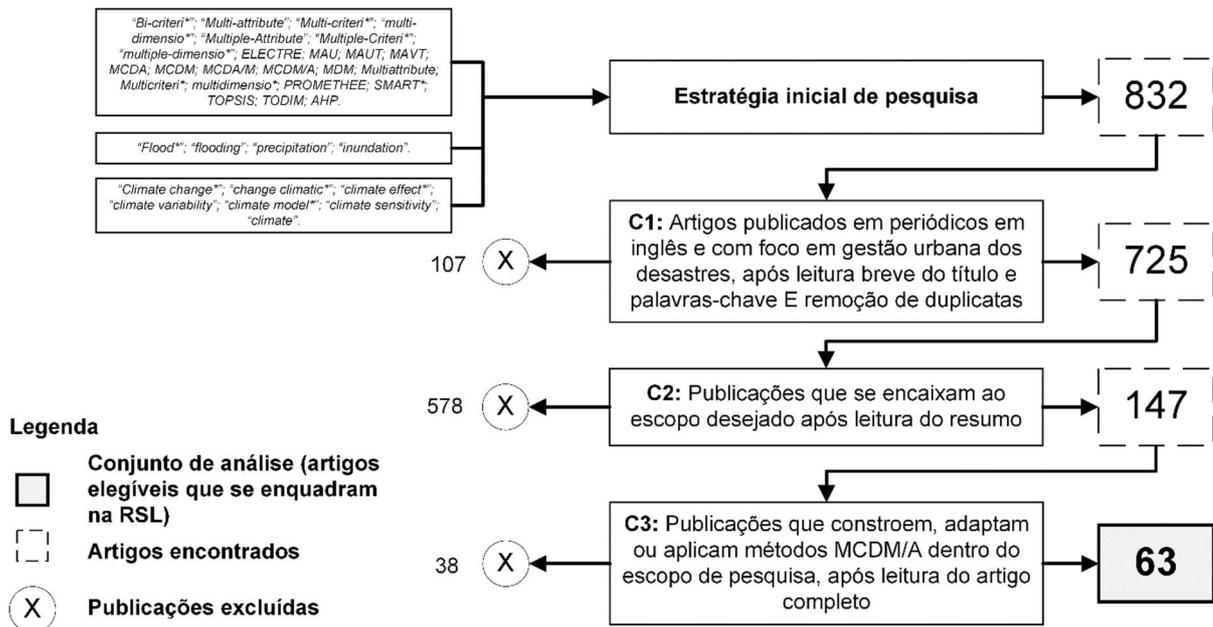
Fonte: O Autor (2022).

- Etapa 2 – Definição de critérios para inclusão/ exclusão

A partir dos resultados iniciais, os protocolos de pesquisa são refinados usando filtros de pesquisa elencados na Figura 2. Estes incluem os critérios de exclusão dos artigos pré-selecionados que não se encaixam no escopo principal, seja por não lidar com o contexto de gerenciamento de riscos em áreas urbanas, ou por uma leitura prévia do título/ resumo, e, quando necessário, do trabalho completo em si.

Assim, todo o processo foi cuidadosamente conduzido para validar a consulta de pesquisa com menos resultados irrelevantes (falso-positivos). Ao aplicar os filtros simultaneamente, e excluindo possíveis duplicações de artigos que estivessem presentes em ambas as bases, o conjunto final de análise compreende 63 artigos elegíveis. Eles foram categorizados de acordo com importantes parâmetros de decisão para tornar as discussões mais didáticas e auxiliar a compreensão do leitor sobre o mapeamento do estado da arte. Os esquemas de classificação são descritos detalhadamente no item 2.2.3.

Figura 2 – Fluxograma com as estratégias de pesquisa para a RSL.



Fonte: Adaptado de da Silva, Alencar & de Almeida (2020).

- Etapa 3 – Coleta, análise e visualização de resultados

A terceira etapa da RSL reúne recursos visuais e métricas relacionados ao escopo, base para agregar e cruzar parâmetros importantes. Com isso, busca-se mapear o estado da arte por meio de uma discussão crítica do conjunto de trabalhos obtido na etapa anterior. As evidências expostas no item 2.2.3 apontam desafios e sugerem diretrizes para que a tomada de decisão nesse contexto possa ser mais eficaz e bem fundamentada. Conseqüentemente, a RSL serviu de motivação para a construção dos modelos de decisão propostos neste trabalho, reforçando, assim, o caráter inovador desta pesquisa.

A seguir, as análises buscam de maneira generalista responder às questões de pesquisa (veja item 2.2.1) que nortearam este estudo preliminar; análises bibliométrica e de conteúdo extensas e aprofundadas podem ser verificadas no artigo publicado no *International Journal of Disaster Risk Reduction* por da Silva, Alencar & de Almeida (2020), como um dos produtos desta tese.

### 2.2.3 Mapeamento dos resultados: discussão e insights

É importante pontuar que alguns dos estudos analisados utilizaram de forma combinada mais de uma metodologia para resolver seus problemas de decisão. Por essa razão, a soma total pode ser superior a quantidade de publicações analisadas. Para fins didáticos, apenas abordagens utilizadas em pelo menos três trabalhos distintos foram consideradas relevantes

para uma discussão crítica. Desse modo, um aspecto preliminar evidenciado nesta revisão revela que poucos estudos qualitativos foram realizados para avaliar os efeitos climáticos na FRM, aproximadamente 4% das aplicações, a exemplo de (MADONSELA et al., 2019; REY et al., 2017; TORRESAN et al., 2016).

Em contraponto, as demais publicações buscaram utilizar técnicas quantitativas para estimar o impacto climático na FRM. Alguns artigos têm usado ferramentas de inteligência artificial – em particular redes neurais artificiais – para agrupar, extrair padrões de decisão e visualizar grandes conjuntos de dados relativos a gestão de desastres urbanos (CHEN et al., 2019; CLARK; SHARMA; SISSON, 2018; KOURGIALAS; KARATZAS, 2016). No mesmo sentido, a mineração de dados (*data mining*) e análise estatística têm se mostrado ferramentas interessantes para priorizar e selecionar políticas de prevenção e redução de riscos de inundação. Além disso, o contexto também requer o uso de técnicas para a alocação de recursos para a implementação dessas medidas, a exemplo da análise hierárquica de cluster (GONDO, 2019), regressão logística (HOYMANN; GOETZKE, 2016) e análise de componentes principais (KOTZEE; REYERS, 2016).

A literatura também aponta um crescente esforço na proposta de estudos multifatoriais para avaliar alguns componentes de risco (como vulnerabilidade e perigo das inundações), bem como selecionar políticas de adaptação climática e avaliar o desempenho de governança para que possam avaliar até que ponto as instituições se prepararam para enfrentar esses eventos indesejados (BROCKHOFF; KOOP; SNEL, 2019; KEENAN, 2015; KIRSHEN et al., 2015; MUELLER, 2013; SOWMYA; JOHN; SHRIVASTHAVA, 2015; VIGUIE; HALLEGATTE, 2012). Entretanto, é necessário salientar que todas as abordagens retratadas acima, embora tenham uma perspectiva multidimensional, carecem em agregá-las numa única métrica; aqui, o decisor é responsável por analisar as múltiplas informações isoladas para que, de posse dos resultados, ele/ela estruture sua decisão.

Nesse contexto, é evidente que a abordagem MCDM/A predomina no uso de metodologias para este tema. Estes compreendem cerca de 72% de todas as metodologias utilizadas pelo estado da arte, incluindo: modelos aditivos e suas variações; AHP (*Analytic Hierarchy Process*); TOPSIS (*Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution*); Fuzzy AHP; Fuzzy TOPSIS; e PROMETHEE (*Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluation*). Entre eles, cabe destacar o uso extensivo de métodos de agregação aditiva (modelos de soma ponderada e suas variações), AHP e TOPSIS. Juntos, eles compõem quase 65% do total de abordagens aos modelos de decisão climática da FRM. A popularidade desses métodos pode ser explicada pela flexibilidade que eles possuem

quando aplicados em casos reais. Além disso, suas estruturas axiomáticas não requerem conhecimento técnico específico e/ou complexos.

Como tendências atuais de pesquisa, as técnicas do MCDM/A vêm sendo ampliadas e combinadas com outros conceitos para apoiar os processos decisórios. Isso é evidenciado pelo uso da lógica *Fuzzy* nos métodos AHP e TOPSIS, que representam cerca de 15% das metodologias utilizadas nos estudos de caso. De fato, contribuições oriundas da Teoria dos Conjuntos Difusos (*Fuzzy Set Theory*) se justificam na necessidade de quantificar, em termos práticos, os aspectos estocásticos das inundações e da variabilidade climática. Aven & Thekdi (2021) enfatizam a necessidade de levar em conta modelos probabilísticos que meçam, de certa forma, fenômenos que o decisor não é capaz de controlar. Algumas publicações levaram em consideração a incerteza usando variáveis proxy *Fuzzy* que mensuram danos causados por inundações (JUN et al., 2013), ou por meio de redes bayesianas (ABEBE; KABIR; TESFAMARIAM, 2018). Além disso, outros autores modelam as preferências do decisor através de técnicas de análise de sensibilidade, como Haque (2016).

Por outro lado, em considerando que o decisor tenha uma experiência mínima sobre o contexto, Chung & Kim (2014) modela a decisão da FRM sob completa incerteza, uma abordagem que pode ser útil quando a disponibilidade de dados é escassa ou quase nula devido às condições locais. Entretanto, um aspecto curioso a ser levantado está na maioria das publicações – em geral, os de agregação aditiva – que não modelam a incerteza, embora este seja um aspecto presente no cotidiano da gestão de inundação. A RSL mostra que apenas 28% das abordagens MCDM/A estabelecem algum tipo de tratamento da incerteza. Isso pode estar relacionado à ausência de dados importantes para avaliar probabilisticamente variáveis naturais e climáticas.

Nessa seara, outra lacuna importante na literatura, no qual os modelos propostos por este trabalho buscam superar, é a escassez de métodos baseados em utilidade, como MAUT (DA SILVA et al., 2020; DA SILVA; ALENCAR; DE ALMEIDA, 2022a, 2022b), RDU (KUILEN; WAKKER, 2011), Teoria dos Prospectos (ROBINSON; BOTZEN, 2019), e demais avanços metodológicos na área. De Brito & Evers (2016) comentam em seus estudos que, embora menos utilizados, modelos baseados em utilidade são simples de usar e suas estruturas axiomáticas se encaixam adequadamente nas necessidades impostas pela complexidade do problema. Além disso, as preferências subjetivas do decisor e seu comportamento ao risco são quantificadas através de loterias (ou prospectos) sobre consequências estocásticas.

Uma análise estratégica dos resultados desta RSL permitiu também identificar os principais tipos de problemas de decisão abordados pelos artigos publicados até então. Embora eles adotem termos técnicos que pareçam diferentes, geralmente os problemas examinados convergem no propósito de indicadores e parâmetros importantes para gestão de desastres hidrológicos em sistemas complexos. De modo geral, as publicações foram classificadas com base na ênfase geral de suas aplicações. Foram identificados oito tipos de aplicações, padronizado da seguinte forma:

1. Avaliação de adequação (*suitability*) de instalações: busca identificar locais adequados para uma gestão e planejamento eficazes perante a ocorrência de desastres naturais. Particularmente nas decisões relacionadas ao uso da terra, inclui uma medida de quão bem as características de uma unidade terrestre correspondem aos requisitos de segurança, assumindo que não apenas o regime de chuvas, mas também os impactos de outros indicadores climáticos, como observado em Berry & Bendor (2015);
2. Relato de lições aprendidas: a falta de aprendizado e experiências passadas ajudam os formuladores de políticas urbanas a moldar decisões em FRM que geram com sucesso os resultados desejados. Por outro lado, aprender com erros ou eventos imprevisíveis de inundação pode atualizar o conhecimento dos decisores sobre como evitar consequências indesejadas (CLARK; SHARMA; SISSON, 2018);
3. Estudo de capacidade de enfrentamento: avalia a capacidade das instituições e sistemas urbanos, em geral, de responder e recuperar dos efeitos climáticos nas inundações graves ou perturbações indiretas que podem alterar potencialmente o funcionamento das cidades (BROCKHOFF; KOOP; SNEL, 2019);
4. Avaliação da Resiliência: apesar de ser um conceito significativo em estudos da FRM, a resiliência não deve ser confundida com a resistência dos sistemas urbanos às inundações. Aqui, esse problema estudado se justifica na necessidade de que as pessoas aprendem a conviver com inundações e recuperam-se delas (KOTZEE; REYERS, 2016);
5. Avaliação de Perigos: o objetivo é entender a probabilidade de que uma inundação de diferentes níveis ocorre de modo a impactar sistemas urbanos ao longo de um horizonte temporal. Este problema apoia as atividades preventivas da FRM estimando e mapeando essa probabilidade ao longo do tempo. Eventos relacionados ao clima trazem mudanças intertemporais no cálculo das probabilidades de ocorrência, o que representa um grande desafio nas decisões de modelagem (HATEGEKIMANA et al., 2018);

6. Avaliação de risco: foco desta tese, os riscos de inundação são combinados com as condições de vulnerabilidade existentes e esta análise integrada pode quantificar como o evento extremo pode potencialmente prejudicar toda a dinâmica urbana (CABRERA; LEE, 2019);

7. Avaliação de Vulnerabilidades: estas publicações visam avaliar a tendência de pessoas e ativos do sistema urbano sofrerem efeitos adversos quando impactados pelos efeitos climáticos e de inundação (SONG; CHUNG, 2016); e

8. Adaptação Urbana: abrange um conjunto de problemas de decisão da FRM que podem ser julgados contemplando a viabilidade e eficácia de medidas alternativas de adaptação aos efeitos climáticos na dinâmica das inundações. Estes envolvem priorizar políticas de adaptação, alocação de recursos para manutenção de infraestrutura e assistência social, avaliação de medidas de controle etc. (VIGUIE; HALLEGATTE, 2012).

Entre eles, fica evidente que os modelos de avaliação e mapeamento de componentes de risco (como vulnerabilidade, perigo, adequação e resiliência) são os mais recorrentes - quase 70% das aplicações. O cerne deste trabalho, a avaliação de risco, pressupõe que se deve quantificar diferentes componentes em conjunto, como a probabilidade de ocorrência, a dinâmica de evacuação e a exposição de pessoas e ativos. Entretanto, dada a multidisciplinaridade envolvida, problemas desse tipo exigem informações fornecidas pela administração pública, instituições governamentais e outros órgãos competentes. Na prática, isso pode ser um obstáculo na evolução de novas metodologias no tema, já que são necessários recursos humanos, tecnológicos e financeiros para estruturar esse banco de dados.

Logo, a ausência de dados já é um desafio amplamente evidenciado nas aplicações de ferramentas de gestão de riscos de desastres. Com a proeminência da variabilidade climática, isso se torna uma urgência global e as disparidades tecnológicas entre os países refletem que os países emergentes sentem mais essas dificuldades. Além disso, de Almeida et al. (2015) expuseram alguns obstáculos à gestão do risco no contexto de desastres naturais, como exemplo a não disponibilidade de um banco de dados confiável, uma vez que a dinâmica urbana faz com que os dados coletados em séries históricas não sejam suficientes por si só para descrever eventos futuros nos estudos em andamento.

Outro aspecto relevante a ser comentado diz respeito à integração dos modelos de risco a ferramentas computacionais, de maneira que podem fornecer uma ampla gama de informações em resultados agregadores. As estatísticas desta revisão mostram a integração de modelos de decisão multidimensional com ferramentas de análise hidrodinâmica e

georreferenciamento. 34% dos trabalhos integram aos modelos de decisão softwares de análise hidrológica. Assim, aspectos geofísicos interagem com simulações de eventos para obter indicadores ambientais de considerável importância (que são fonte de dano direto ao sistema urbano) como vazão, profundidade de água etc., como mencionado em pesquisas relevantes (BERTILSSON et al., 2019; GRAFF et al., 2019; HAIDER et al., 2019; SEPEHRI et al., 2019). Além disso, Alves et al. (2018) usou isso como uma fase de triagem para definir alternativas na modelagem do problema. Por outro lado, 62% dos artigos utilizam plataformas GIS integradas com outras tecnologias. O georreferenciamento é uma ferramenta essencial e poderosa para reduzir ou eliminar viés durante a análise e percepção de risco (KOURGIALAS; KARATZAS, 2017). Seus benefícios incluem que aumenta o aprendizado sobre os recursos disponíveis em uma determinada área (SOWMYA; JOHN; SHRIVASTHAVA, 2015); reduz o tempo necessário para elaborar relatórios, gráficos e mapas, o que melhora a eficácia das informações geográficas utilizadas na análise de políticas e ao avaliar opções de planejamento (BERRY; BENDOR, 2015); e produz novas informações devido à sua capacidade de manipular dados previamente disponíveis, graças ao recurso de manipulação de dados por via computacional (TORRESAN et al., 2016). Assim, essa integração já é uma realidade e reforça o que estudos anteriores apontaram (DE ALMEIDA et al., 2017): que as ferramentas GIS são uma tendência sólida na área.

Dentre as evidências até aqui detalhadas, é possível afirmar que a literatura ainda carece de estudos voltados para a modelagem da incerteza e da variabilidade climática na tomada de decisão. Aven & Renn (2015) pontuam esta limitação, presente nos relatórios climáticos do IPCC, cujas diretrizes estruturam importantes acordos globais para prevenção dos impactos do clima neste século. Ademais, uma análise mais profunda dos artigos selecionados revela que a maioria dos problemas considera os efeitos climáticos por meio de métricas ambientais – como o aumento do nível do mar, a faixa média das marés, o regime de chuvas, as tendências de temperatura etc. –, apesar de isso ainda ser rudimentar, quando comparada à complexidade decorrente da dinâmica climática.

Em geral, a análise do estado da arte revela que faltam procedimentos formais para modelagem climática envolvendo a avaliação de riscos de inundações; de modo alternativo, projeções de concentração de gases poluentes (*Representative Concentration Pathways*: RCP) estimadas por Modelos de Circulação Global (MCGs) são empregados por algumas publicações a fim de quantificar o comportamento do clima, como observado em (CABRERA; LEE, 2018; HSU et al., 2017; KEENAN, 2015; LILAI et al., 2016). Além disso, a simulação climática pode ser feita utilizando cenários futuros de planejamento urbano e

demandas de uso da terra, a fim de analisar como as medidas de adaptação urbana podem reduzir os impactos das inundações. Os modelos propostos nesta tese fazem uso de cenários climáticos, à luz do IPCC, para georreferenciar áreas mais arriscadas para implementação de políticas mitigadoras.

A RSL investigou também as principais dimensões analisadas em problemas relacionados ao tema desta pesquisa. As métricas de decisão são os parâmetros utilizados para medir os danos, impactos ou desempenho dos critérios sob análise. Para fins didáticos, os indicadores foram agrupados em seis tipos de critérios, a saber:

- Ambiental/Climática (17%): medidas de danos à biodiversidade sobre a qual a análise de aspectos hidrológicos e até climáticos são realizados;
- Financeiro (13%): efeitos danosos nos setores financeiro e produtivo, bem como a renda familiar, são uma barreira econômica para as sociedades de modo que elas precisam garantir condições favoráveis para a recuperação da população exposta;
- Geofísica (14%): refere-se a uma das causas naturais e não menos relevantes das inundações. Evidências geológicas, topográficas ou físicas, também sujeitas a mudança climática, são importantes para a possível investigação de fatores intrínsecos que levam a ocorrência de eventos extremos;
- Institucional (9%): descreve o desempenho da capacidade governamental ou institucional, uma vez que o nível de articulação política, a disponibilidade de recursos humanos, técnicos e financeiros são essenciais para a gestão dos riscos de inundação de forma eficiente;
- Social (26%): envolve indicadores sobre perdas humanas, danos físicos, culturais e materiais às famílias (além de perdas monetárias e patrimoniais) para que as instituições públicas estruturam políticas de assistência social à população afetada; e
- Técnico/Infraestrutura (21%): dados técnicos de especificação e planejamento estratégico são importantes para a implementação de projetos de mitigação climática. Além disso, os danos à infraestrutura crítica são prejudiciais ao funcionamento dos sistemas urbanos.

Por fim, vale a pena comentar sobre a racionalidade (ou seja, a forma como o decisor modela suas preferências) utilizada nos trabalhos para estabelecer a relação entre os critérios. Os métodos MCDM/A encontrados quase inteiramente incluem modelos compensatórios. Ou seja, o decisor adota uma estrutura de preferência que permite a compensação por perdas, danos ou outras medidas de desempenho entre os critérios estabelecidos para a tomada de decisão. No entanto, é essencial avaliar, no processo de construção, até que ponto a

compensação entre as dimensões pode ser considerada para que a modelagem matemática traduza as preferências do decisor. Apenas uma publicação analisada trata de forma não compensatória com o problema da adaptação urbana por meio do PROMETHEE, embora não envolva aspectos probabilísticos em sua metodologia (ALHUMAID et al., 2018).

Especialmente em métodos compensatórios, um alerta a ser considerado na aplicação das metodologias vigentes está na correlação entre indicadores de critérios, com o objetivo de validar as premissas de independência na modelagem de preferências (DE ALMEIDA et al., 2015). Isso é importante porque a maioria dos artigos utiliza modelos aditivos para agregar múltiplos risco em uma única métrica, e as premissas de independência devem ser verificadas para validar a forma aditiva linear. No entanto, todos os trabalhos que utilizam essa abordagem incluíram como premissas de seus modelos que a ponderação dos riscos multidimensionais é matematicamente válida.

Além disso, é possível observar que a condução do processo decisório em grande parte das publicações analisadas envolve a interação entre diversos *stakeholders* e especialistas que se engajam no processo de tomada de decisão, como gerentes técnicos, engenheiros, políticos, representantes da sociedade civil, funcionários do setor privado etc. Ao fornecer informações factuais para o problema, eles apoiam o decisor no processo de decisão. Essa interação pode ser percebida dentro das aplicações do método MCDM/A, bem como por outros procedimentos auxiliares para agregar tais informações, como o método *Delphi* (JUN et al., 2011). Além disso, como possível fonte de *insights* sobre a melhor forma de gerir esses critérios, cabe avaliar em estudos possíveis relações hierárquicas entre os indicadores, a fim de estruturar melhor os critérios do problema de decisão. Embora a suposição de atributos hierárquicos possa representar melhor o problema para os decisores, alguns estudos apontam para a necessidade de estabelecer uma obtenção adequada dos parâmetros que representam os pesos de cada atributo, uma vez que o viés no processo tem sido observado com frequência nos trabalhos precursores de Pöyhönen & Hämäläinen (1998) e Pöyhönen, Vrolijk & Hämäläinen (2001).

### 2.3 Síntese do Estado da Arte e Posicionamento desta Tese

A partir da análise do estado da arte sobre os métodos de gerenciamento de riscos de inundações sob ação climática, é possível estabelecer diretrizes, apontar limitações/ desafios, e explorar oportunidades de pesquisa que motivaram a proposição dos modelos desenvolvidos por este trabalho. A seguir, a Tabela 2 resume as principais evidências que mapeiam a literatura vigente.

As principais evidências relatadas neste capítulo foram publicadas como desdobramento preliminar desta tese em da Silva et al. (2020). Neste contexto, a contribuição adicional deste trabalho considerando os métodos já existentes na literatura é poder superar as principais limitações impostas a esse contexto de aplicação, como poucos modelos de decisão tentam simular condições adversas futuras devido ao clima ou à urbanização e, além delas, a maioria deles utiliza técnicas generalistas geralmente de relatórios públicos globais para apoiar decisões locais sob situação de incerteza.

Tabela 2 – Resumo das principais evidências após mapeamento do estado da arte com a RSL

<b>Reflexões motivadoras</b>	<b>Diretrizes, desafios e/ou oportunidades de pesquisa</b>
<p>P1. Quais métodos MCDM/A e problemas típicos de decisão são usualmente empregados para enfrentar o efeito climática em FRM?</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Predomínio no uso da racionalidade compensatória com modelos aditivos e suas variações;</li> <li>• A maioria das abordagens não levam em consideração aspectos probabilísticos típicos do contexto de inundação;</li> <li>• Modelos de avaliação e mapeamento de risco e seus componentes (como vulnerabilidade, perigo, adequação e resiliência) são os mais recorrentes;</li> <li>• Destaque para a tendência em estudos que estruturam planos de adaptação urbana (34% das aplicações), incluindo o desenvolvimento de modelos de decisão que buscam selecionar e alocar recursos para a adoção de políticas de prevenção e mitigação climáticas.</li> <li>• Sob a ótica MCDM/A, os problemas envolvem majoritariamente a problemática de ordenação, embora haja trabalhos com seleção de portfólio de alternativas; em contraponto, escassez de abordagens para classificação de risco.</li> <li>• Faltam procedimentos formais para modelagem climática em problemas multidimensionais;</li> <li>• Dados do IPCC, como cenários de <i>RCP</i> (baseados na emissão de gases poluentes) ou projeções climáticas predefinidas são alternativas úteis para quantificar o comportamento futuro do clima;</li> <li>• Requer em muitos trabalhos o uso de tecnologias que revelam como a disparidade tecnológica entre as sociedades justificam as limitações das atuais práticas de FRM;</li> <li>• A maioria dos problemas considera os efeitos climáticos por meio de métricas ambientais, apesar de ainda ser rudimentar ao comparar a</li> </ul>
<p>P2. Como os recentes trabalhos modelam matematicamente os impactos das mudanças climáticas sobre os problemas de FRM?</p>	

P3. Como as ferramentas de georreferenciamento contribuem para aprimorar o processo decisório e, assim, mitigar os efeitos climáticos?

P4. Quais critérios, indicadores, medidas e outros parâmetros são levados em conta na tomada de decisão em FRM?

P5. Como a falta de dados e a limitação de *expertise* levam à necessidade de considerar a incerteza na estruturação de problemas na FRM?

complexidade decorrente da dinâmica climática.

- O uso e compartilhamento de ferramentas GIS é um fator-chave para o desenvolvimento de novas formas de visualização de riscos.

- A disseminação do software baseado em GIS, além de sua versatilidade, pode ser feita usando recursos computacionais que os integram em métodos MCDM/A.

- Ao misturar essas abordagens, leva a um aumento na percepção das pessoas sobre os riscos e posterior comunicação a população afetada.

- Foram observados mais de 500 indicadores agrupados em seis critérios: Social, Técnico/Infraestrutura, Ambiental/Climático, Econômico, Geofísico e Institucional.

- Nota-se uma baixa incidência de indicadores que mencionam aspectos da saúde pública prejudicados causados pelas inundações.

- Problemas que envolvem o tema exigem informações fornecidas pela administração pública, instituições de controle e monitoramento e outros órgãos competentes;

- Isto pode ser um obstáculo na evolução de novas metodologias no tema, pois recursos humanos, tecnológicos e financeiros são necessários para estruturar esse banco de dados;

- Necessidade de considerar a incerteza nas modelagens de riscos climáticos, embora haja uma escassez de métodos baseados em utilidade e seus avanços metodológicos (MAUT, RDU, Teoria dos Prospectos etc.) que são adequados para tal.

Fonte: O Autor (2022).

Isto motivou claramente o desenvolvimento dos dois modelos de risco estacionário propostos no capítulo 3 e publicado em revistas internacionais (DA SILVA et al., 2020; DA SILVA; ALENCAR; DE ALMEIDA, 2022a). A diferença entre eles está na perspectiva tratada para modelagem dos padrões de chuva, considerando a possibilidade de que as projeções climáticas do IPCC podem impactar a criticidade do risco de inundação.

Esta tese reúne também outra importante contribuição inovadora, visto que, apesar de muitas ferramentas computacionais terem sido desenvolvidas para prever impactos de inundação e demográficas, quase todos os modelos de risco são focados na análise estacionária, ou seja, não assumem uma dependência temporal da modelagem de preferências ou cenários acidentais nas sociedades modernas. Uma vez que o espaço urbano é naturalmente dinâmico, o capítulo 4 preenche essa notável lacuna, cujo novo método para

avaliação de riscos não-estacionários já se encontra presente na literatura (DA SILVA; ALENCAR; DE ALMEIDA, 2022b).

Por fim, a aplicabilidade dos modelos em casos reais, replicáveis em qualquer contexto de inundação urbana, é reforçada através da construção de um produto tecnológico disponível no endereço ([www.reason.org.br/floodmatters](http://www.reason.org.br/floodmatters)), cujo processo de registro encontra-se em andamento junto ao INPI (DE ALMEIDA; DA SILVA; ALENCAR, 2022).

### **3 MODELOS DE DECISÃO MULTIATRIBUTO E ESTACIONÁRIO PARA AVALIAÇÃO DE RISCO DE INUNDAÇÃO URBANA COM MAUT E ANÁLISE DA DECISÃO**

Neste capítulo, são apresentadas de forma integrada duas propostas de modelagem para priorização de risco de inundação urbana sob uma perspectiva multidimensional, e cujas contribuições pretendem aprimorar as práticas de gestão de desastres em um horizonte de análise curto e/ou longo, a depender de como os efeitos climáticos futuro são previstos (item 3.1). Adicionalmente, a implementação dos modelos em casos realísticos por meio de um SAD ilustra uma aplicação numérica, como pode ser vista no item 3.2. Por fim, o item 3.3 compartilha as principais contribuições, limitações e *insights* para o contexto de FRM.

#### **3.1 Descrição do modelo baseado em utilidade sob as perspectivas atual e futura de risco**

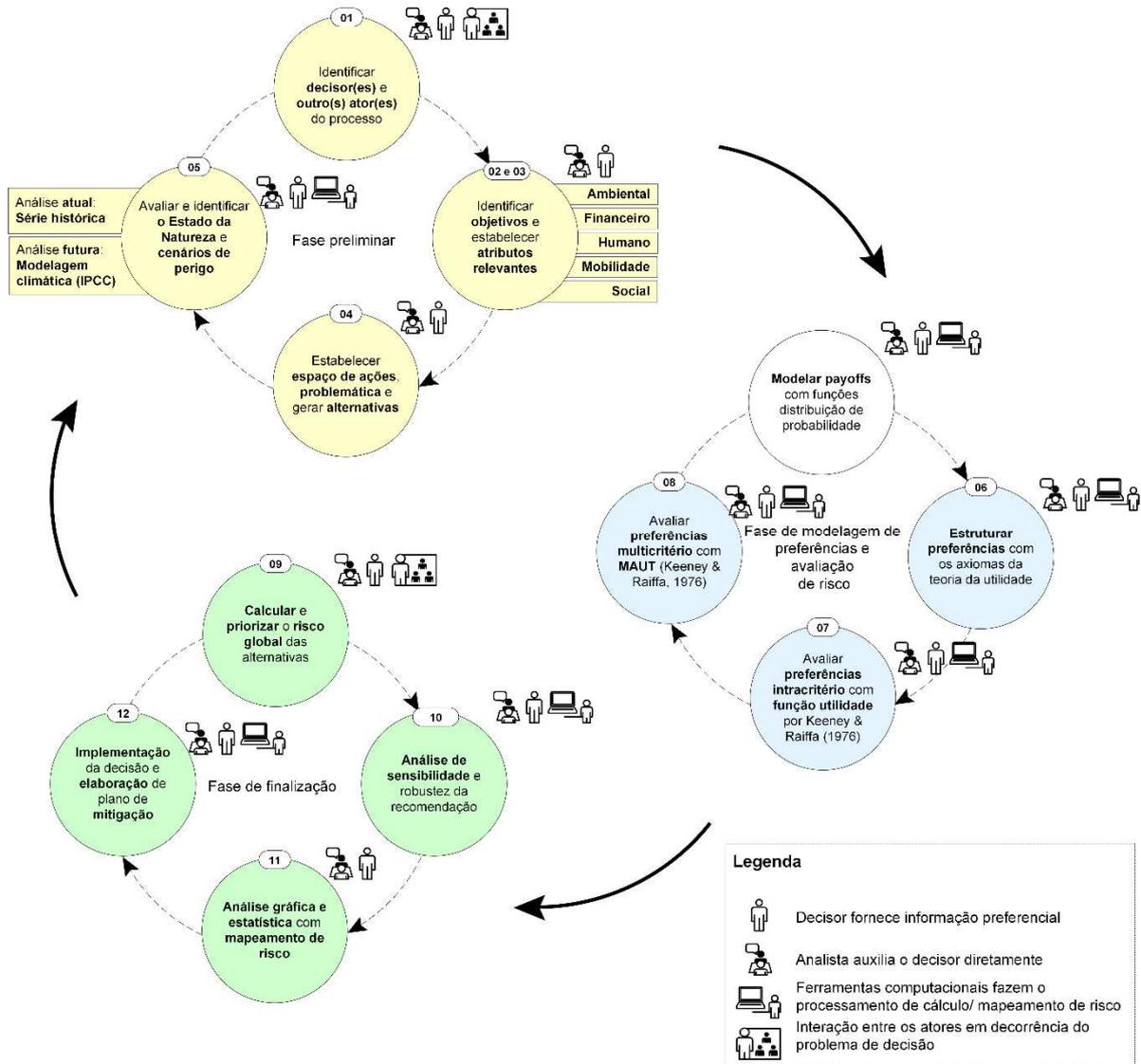
Como discutido anteriormente no capítulo 2, o modelo de decisão proposto e publicado em da Silva et al. (2020) como produto desta tese foi concebido para cobrir importantes lacunas do estado da arte, utilizando uma análise integrada de múltiplos danos causados por eventos hidrológicos na funcionalidade do sistema urbano. Para tanto, faz-se uso do método MAUT, pela qual julgamentos subjetivos do decisor ajudam a estabelecer preferências sobre diferentes consequências probabilísticas potencialmente causadas pelas inundações, assumindo que não há no modelo variações substanciais com o tempo, isto é, ele é estacionário.

Assim, este modelo trata da problemática de ordenação a fim de priorizar áreas urbanas de acordo com a criticidade de riscos ambiental, financeiro, humano, de mobilidade e social numa perspectiva de curto prazo, com base em informações passadas sobre os eventos ocorridos até então. Em contraponto, o modelo para tomada de decisão a longo prazo publicado em da Silva, Alencar & de Almeida (2022a) buscou estender o primeiro modelo, inserindo a previsão do clima futuro para identificar e quantificar as fontes de risco em dois cenários de emissão de gases de efeito estufa (GEE), de modo que permite ao decisores acessar importantes informações para se antecipar a riscos climáticos deste século.

Ressalta-se que ambos os modelos são flexíveis e que podem ser replicados em qualquer espaço urbano, desde que atenda aos requisitos necessários para sua aplicação. Ferramentas de mapeamento de riscos com GIS e visualização gráfica são usadas para melhorar a análise e percepção de riscos, a fim de estruturar ações estratégicas em áreas críticas por meio de um plano multidimensional para mitigar desastres urbanos.

O fluxograma descrito na Figura 3 apresenta a metodologia de pesquisa deste capítulo, e isso inclui o procedimento global de avaliação do risco global de inundação.

Figura 3 – Fluxograma para aplicação dos modelos de decisão MCDM/A estacionários a curto e longo prazo.



Fonte: Adaptado de da Silva et al. (2020).

Os modelos propostos incluem aspectos probabilísticos inerentes ao contexto de decisão, integrando características úteis do MAUT e Análise da Decisão. Com isso em mente, o modelo é dividido didaticamente em 12 etapas, adaptadas do framework para resolução de um problema de decisão MCDM/A por de Almeida et al. (2015). Elas compreendem três fases principais para a resolução do problema, em que o papel (bem definido) de cada ator no processo de decisão é esclarecido.

Na fase preliminar, os esforços estão concentrados no alinhamento e interação entre o decisor, o analista e outros especialistas técnicos com o objetivo de caracterizar o evento indesejado no sistema urbano. Além disso, as suposições identificadas nesta fase sustentam como aplicar as modelagens, seja qual for a localização do estudo. Dados essenciais sobre os diversos impactos do evento extremo são parametrizados de modo a auxiliar as fases de modelagem das preferências e avaliação de riscos.

### 3.1.1 Identificação do(s) decisor(es) e outros atores do processo

A qualidade de uma tomada de decisão complexa está relacionada não apenas ao comportamento do decisor, mas também à circunstância em que ele está envolvido e à maneira como ele/ela aborda o problema (DE ALMEIDA et al., 2015). Tendo isso em mente, o complexo sistema abordado por estes modelos exige que o problema seja adequadamente estruturado e sustentado pelas seguintes premissas:

- Os decisores possuem responsabilidade objetiva sobre a decisão associada ao gerenciamento de inundações em toda a sua extensão urbana. Para o contexto em estudo, eles geralmente exercem cargos na administração pública de modo que possuem conhecimento técnico e estratégico das diversas demandas comunitárias;
- Todos os atores desempenham papéis bem definidos que não conflitam entre si. Isso contribui para aumentar a credibilidade do processo de tomada de decisão e, portanto, para a realização mais plena dos benefícios potenciais derivados da aplicação dessa modelagem; e
- Analistas e especialistas contribuem fornecendo informações factuais para o decisor para que ele possa ter uma compreensão mais completa da natureza multidimensional do ambiente envolvido quando envolvido na gestão de riscos de inundações em uma área urbana.

Em razão do caráter multidisciplinar envolvido no âmbito da FRM, os decisores podem tomar decisões conjuntas, no caso de múltiplos decisores, ou ainda um único decisor pode atuar no problema. Nesse sentido, a exemplo do SAD proposto no capítulo 5 para aplicar numericamente os modelos, estes permitem apenas uma única avaliação por vez, de modo que o foco desta tese se concentra em um processo de decisão individual. Entretanto, em um contexto de decisão em grupo, os modelos matemáticos aqui apresentados podem ser conduzidos isoladamente para cada decisor, a fim de que a avaliação em grupo seja possível por meio da agregação dos *rankings* finais (DE ALMEIDA et al., 2015). A *posteriori*,

abordagens para tomada de decisão em grupo podem ser inseridas como trabalhos futuros, melhorando todos os modelos discutidos neste trabalho.

### 3.1.2 Identificação dos objetivos

De forma análoga ao contexto motivador que levou este trabalho a desenvolver modelos para avaliação de risco a curto (DA SILVA et al., 2020) e longo prazo (DA SILVA; ALENCAR; DE ALMEIDA, 2022a), o objetivo principal destas abordagens visa proporcionar a gestores públicos e outros decisores um plano de priorização de riscos de inundação com base nas estratégias de adaptação urbana frente aos efeitos danosos do clima. Para tanto, múltiplos objetivos, caracterizados no item a seguir por atributos, devem ser levados em conta para reduzir potenciais perdas causadas pelo evento indesejado e usualmente podem ser conflitantes entre si.

Em termos práticos, relatórios de acidentes passados, planos de contingenciamento de desastres ou redução de riscos, além das informações hidrometeorológicas disponibilizadas por instituições de controle e monitoramento embasam as fontes de demanda e sugerem metas para o desenvolvimento sustentável das cidades (O'DONNELL; THORNE, 2020). Por esta razão, estes são denotados atributos relevantes dos modelos MCDM/A para avaliação de riscos de inundações, conforme apresentado no item a seguir.

### 3.1.3 Estabelecimento dos critérios relevantes

Vale ressaltar que as medições dos danos, ou seja, consequências das inundações, podem ser estabelecidas através da interação entre pesquisadores e *stakeholders*, como gestores, autoridades locais, engenheiros, ambientalistas e outros funcionários de diferentes institutos locais que monitoram e controlam os eventos naturais.

Vários estudos na literatura dispostos no item 2.2 exploram diferentes dimensões do risco de inundação, e apoiam a hipótese desse modelo de que existem cinco atributos principais. Isso foi reforçado após algumas reuniões e entrevistas realizadas localmente em que os participantes afirmaram quais são suas preocupações atuais e futuras com o objetivo de indicar como medir adequadamente os danos causados pelos eventos hidrológicos (PRIORI; ALENCAR; DE ALMEIDA, 2017). Desse modo, as medidas descritas na Tabela 3 transmitem como os gestores compreendem melhor a magnitude das perdas de inundações. Cada dimensão a ser avaliada aqui é denotada genericamente por "*atr*".

Dessa forma, os cinco atributos de decisão abrangem muitas das perspectivas de risco a serem analisadas no contexto do MCDM/A com as quais assumimos que são suficientes e

úteis para caracterizar as demandas atuais da sociedade e lidar com os efeitos nocivos das inundações, como amplamente discutido em da Silva, Alencar, et al. (2020). Por outro lado, os especialistas podem compartilhar seus conhecimentos prévios sobre esse campo para refinar a estimativa de consequências, o que reforça o quanto a aprendizagem contínua pode contribuir para o aprimoramento dessas funções.

Tabela 3 – Resumo dos atributos de decisão para os modelos propostos, seguindo os objetivos de Desenvolvimento Sustentável Urbano (ICLE, 2020)

<b>Atributo</b>	<b>Descrição</b>	<b>Consequência, <math>x</math></b>	<b>Função consequência, <math>f_{atr}(x \theta, a_i)</math></b>
Ambiental/ Sanitário (WATANABE; TESKE; HAAS, 2014)	Analisa até que ponto as enchentes contaminam os corpos d'água, espalhando assim doenças infecciosas.	A concentração de patógenos bacterianos ( $\mu\text{g/ml}$ )	<i>Beta-Poisson</i>
Financeiro (ZHANG; SINGH, 2005)	Inclui custos financeiros diretos de patrimônios públicos e privados. Isso impacta também infraestrutura urbana, comércio e serviços.	Perdas monetárias por área (R\$/hec)	<i>Lognormal</i>
Humano (DA SILVA et al., 2020)	Investiga a perda de vidas humanas, uma vez que a vulnerabilidade e a exposição de áreas urbanas aliadas aos altos níveis de severidade levam a mortes (fatalidades).	O número médio de fatalidades	<i>Poisson</i>
Mobilidade (PREGNOLATO et al., 2017)	Avalia a diminuição da velocidade média sem fazer com que os veículos na estrada arterial sejam retidos excessivamente. A gravidade do desastre pode interromper total ou parcialmente os serviços públicos essenciais à população, como a prestação de cuidados médicos, lazer e cultura, segurança e educação.	Interrupção dos serviços de transporte em via arterial (%)	<i>Beta</i>
Social (BEZGREBELNA et al., 2021)	Estima a demanda social por assistência institucional devido à impossibilidade de as famílias retornarem às suas casas por estarem parcial ou totalmente destruídas.	O número médio de famílias desabrigadas ou domicílios afetados	<i>Poisson</i>

Fonte: O Autor (2022).

Assim, além de definir os parâmetros-chave para mensurar os danos causados pelo evento hidrológico, os modelos formulam funções de consequência

$f_{atr}(x|\theta, a_i)$  em termos de distribuições de probabilidades, a fim de analisar sob diferentes níveis de perigo  $\theta_j$  (veja item 3.1.5) que podem ocorrer em cada zona urbana  $a_i$ . Por exemplo, o atributo de mobilidade leva em conta o impacto logístico na principal estrada arterial de cada zona urbana, onde a administração pública estima, a partir dos níveis de precipitação – e, por conseguinte, a lâmina d’água – o nível de redução da velocidade média dos veículos em relação à velocidade máxima permitida nesta via.

Entretanto, para realizar essa fase, deve ser validada a hipótese de independência de probabilidades entre atributos e zonas urbanas que compõem o conjunto de alternativas. Em linhas gerais, as consequências ocorrem de forma aleatória e independente, dependendo das características espaciais de cada zona urbana para que possam ser estimadas isoladamente. Além disso, admite-se que os acidentes não se espalham entre as zonas, e que nem o nível de consequências é necessariamente proporcional ao tamanho das áreas urbanas. Em outras palavras, embora se espere que zonas urbanas de áreas maiores sofram maiores danos, isso não é necessariamente verdade, pois o impacto depende de fatores como sua infraestrutura crítica, proximidade com serviços essenciais de emergência e o nível de escolaridade da população. De fato, essa é uma das vantagens dos modelos MCDM/A propostos, pois permite a interação entre esses fatores e o risco potencial que afeta o estudo de caso. Esse comportamento é formulado matematicamente a partir da interação do decisor com o analista em ambos os modelos explorando  $f_{atr}(x|\theta, a_i)$  mais adiante, na etapa de modelagem de *payoffs*, durante a transição para a fase de modelagem de preferências.

### 3.1.4 *Estabelecimento da estrutura do espaço de ações, da problemática e desenvolvimento do processo de geração de alternativas*

A área urbana, que foi definida inicialmente para aplicar os modelos, é dividida espacialmente em  $n$  zonas ou alternativas. Nesse sentido, o decisor obtém um conjunto discreto de alternativas e denotado aqui pelo conjunto  $\mathbf{A} = \{a_1, a_2, \dots, a_n\}$ . Sob as práticas atuais de gestão de desastres e suas necessidades, ele/ela deve estabelecer como as alternativas serão priorizadas no contexto da decisão. Logo, a problemática em foco neste capítulo é a de ordenação as alternativas de acordo com a criticidade de risco.

Quanto ao processo de geração de alternativas, cabe ao analista ajudar na delimitação das zonas urbanas de acordo com a divisão político-geográfica local ou o zoneamento e o planejamento do uso da terra, por exemplo. No entanto, as informações factuais fornecidas por especialistas ou analistas podem exigir uma delimitação personalizada do conjunto  $\mathbf{A}$ .

Padrões de homogeneidade, zoneamento estratégico ou outras medidas de interesse são apenas alguns dos exemplos que podem ser considerados.

Depois de identificadas as suposições iniciais, o próximo passo é garantir que os danos potenciais causados pelas inundações sejam estimados corretamente. Isso requer que o modelo incorpore o regime hidrológico local em sua estrutura axiomática, uma vez que o regime de precipitação que desencadeia um evento extremo é o fator crucial.

### 3.1.5 Avaliação e identificação de fatores não controlados: os estados da Natureza

Nesse contexto, faz-se necessário compreender que a precipitação não se comporta de forma padronizada nem pode ser gerenciada pela ação humana, de forma que o decisor deve considerar isso como um fator não controlado. Como a intensidade das chuvas interage com o espaço urbano e a lâmina d'água das inundações resulta disso, o parâmetro hidrológico mais significativo é o regime de precipitação, o que implica nos modelos que isso represente o estado da natureza,  $\theta$ .

Especificamente nesta etapa, ambos os modelos assumem perspectivas diferentes ao expressar o comportamento probabilístico de  $\theta$ . Sob a perspectiva de curto prazo, da Silva et al. (2020) detalha que o analista deve auxiliar o decisor em uma análise probabilística das inundações, ajustando séries históricas de inundações em uma função de densidade de probabilidade (FDP) apropriada, que é representada pela notação " $\pi_\theta$ " no modelo.

Nessa seara, a análise de previsão para ocorrência de enchentes é amplamente discutida na literatura (ASHLEY et al., 2005; GAUME et al., 2010; LAWRENCE et al., 2013; SERINALDI; KILSBY, 2014; WANG; ZHOU; ZHANG, 2015). Estes trabalhos reforçam que a distribuição generalizada de valor extremo (*Generalized Extreme Value*: GEV) é amplamente aplicada a fim de modelar extremos de processos hidrológicos, incluindo inundações, velocidades do vento, altura das ondas e outros extremos. Portanto, este modelo considera que o ajuste à distribuição GEV é um parâmetro adequado para a previsão de eventos hidrológicos ao analisar seu impacto físico no sistema urbano. A distribuição GEV é um modelo flexível de três parâmetros que combina as distribuições extremas de valor máximo de *Gumbel*, *Fréchet* e *Weibull*, conforme disposto na equação 3, onde  $\xi$ ,  $\sigma$  e  $\mu$  são parâmetros de forma, escala e localização, respectivamente.

$$\pi_\theta = GEV(\mu, \sigma, \xi) = \begin{cases} e^{\left(-\left(1+\xi\left(\frac{\theta-\mu}{\sigma}\right)\right)^{-\frac{1}{\xi}}\right)}, & \text{para } \xi \neq 0; 1 + \xi \left(\frac{\theta - \mu}{\sigma}\right) > 0 \\ e^{-e^{\left(-\left(\frac{\theta-\mu}{\sigma}\right)\right)}}, & \text{para } \xi = 0 \end{cases} \quad (3)$$

Para fins didáticos, este capítulo usa a notação  $GEV(\mu, \sigma, \xi)$  para indicar, neste caso, o comportamento hidrológico no local em estudo. Adicionalmente, pode ser aplicado teste estatístico de aderência para avaliar sob o ponto de vista estatístico o grau de ajuste dos dados históricos à distribuição supracitada.

Já sob uma perspectiva de longo prazo, no qual se pretende avaliar os efeitos climáticos deste século, a necessidade de entender o clima futuro tem motivado as agências de monitoramento a desenvolver a ciência da modelagem climática como uma abordagem à tecnologia institucional e à governança política em todo o mundo para combater desastres naturais (HELD; ROGER, 2018). Diante desse contexto, os relatórios do IPCC expressam a percepção global das mudanças climáticas, em que uma variedade de índices físicos (incluindo padrões de precipitação) são simulados em diferentes cenários climáticos chamados *Representative Concentration Pathways* (RCPs); em termos gerais, eles representam padrões dos níveis de emissão de Gases de Efeito Estufa (GEE) que são projetados para impactar as sociedades durante as próximas décadas (IPCC, 2021).

Nesse contexto, da Silva, Alencar & de Almeida (2022a) concentra os esforços desta etapa em quantificar a frequência e intensidade de precipitações futuras em um horizonte de tempo  $T$  integrando à  $GEV(\mu, \sigma, \xi)$  as previsões do padrão de precipitação local oriundas de Modelos de Circulação Geral (MCGs). Estes fazem uso de equações matemáticas que as representam, sob leis físicas, e diferem umas das outras de acordo com a forma como cada MCG modela as interações complexas entre os vários componentes do sistema climático/físico, ou seja, os efeitos mútuos da atmosfera com a hidrosfera, a criosfera, a biosfera, as emissões de GEE, e outros componentes (ABBASIAN; MOGHIM; ABRISHAMCHI, 2019).

Eles são apoiados por informações meteorológicas de estações climáticas em diferentes lugares do mundo. Muitos MCGs foram desenvolvidos por diferentes centros meteorológicos e diferem uns dos outros de acordo com sua complexidade ou seus parâmetros necessários. Na prática, esses modelos foram regionalizados para incorporar detalhes locais na modelagem climática. Apesar dessas técnicas serem dispendiosas e requererem de computadores de alta capacidade de processamento, as agências de monitoramento de diversos países fornecem previsões em bancos de dados de acesso aberto para fins estratégicos.

Como mencionado por da Silva, Alencar, et al. (2020), isso é muito importante porque as disparidades tecnológicas entre as sociedades podem levar os países emergentes a enfrentar dificuldades na detecção de suas fragilidades em meio a este risco natural e, por conseguinte, na replicação do modelo de análise a longo prazo proposto neste capítulo. Aqui, a principal

tarefa é usar padrões de precipitação de MCGs para detectar a influência de séries temporais nas tendências e variabilidade de eventos indesejados.

A Tabela 4 a seguir resume os principais modelos climáticos usados no Brasil, regionalizados às condições locais por técnicas de *downscaling*, Tal base de dados é disponibilizada na plataforma PROJETA desenvolvida pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) para o contexto brasileiro (CPTEC/INPE, 2021).

Tabela 4 – Principais MCGs utilizados pelo INPE para previsão climática no Brasil

Modelo	Instituição	Resolução Espacial	Referência
BESM <i>Brazilian Earth System Model</i>	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais	20 km	(NOBRE et al., 2013)
CanESM2 <i>Canadian Earth System Model 2</i>	<i>Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis</i>	20 km	(ARORA et al., 2011)
HadGEM2-ES <i>Hadley Global Environment Model 2 - Earth System</i>	<i>Met Office Hadley Centre</i>	20 km	(COLLINS et al., 2011)
MIROC5 <i>Model for Interdisciplinary Research On Climate</i>	<i>The University of Tokyo, National Institute for Environmental Studies, e Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology</i>	20 km	(WATANABE et al., 2010)

Fonte: Adaptado de CPTEC/INPE (2021).

Assim, o banco de dados referenciado na Tabela 4 leva os MCGs a simular padrões de precipitação sob dois cenários climáticos, a saber:

- Cenário de estabilização (ou RCP 4.5): Pressupõe que uma ampla gama de tecnologias e estratégias de mitigação para a redução do GEE levem o nível de força radiativa a estabilizar-se a 4,5 W/m<sup>2</sup> antes de 2100;
- Cenário *business-as-usual* (ou RCP 8.5): Essa trajetória climática insere uma perspectiva pessimista sobre a eficácia da mitigação climática, na qual altos níveis de GEE implicam que a força radiativa chegará a 8,5 W/m<sup>2</sup> até o final deste século.

Dessa forma, as previsões de  $\theta$  permitem quantificar na forma de uma distribuição  $GEV(\mu, \sigma, \xi)$  como o evento hidrológico incidirá sobre o local de análise. Para tanto, esta etapa estabelece uma breve regra de decisão a fim de escolher o modelo climático mais adequado para a análise de risco. Em resumo, da Silva, Alencar & de Almeida (2022a) medem o desempenho dos MCGs após comparar os dados projetados com os dados reais, assumindo que este é um período para o qual é possível obter registros passados ( $t \leq t_d$ ),

como amplamente investigado por Abbasian et al. (2019). Sendo assim, a regra de decisão consiste em:

- Análise de desempenho – Erro Absoluto Médio (EMA, equação 4) e o Erro de Quadrado-Médio Raiz (REMQ, equação 5) são indicadores que apoiam a seleção do modelo climático. Lá,  $y_j$  e  $\hat{y}_j$  representam, respectivamente, os índices de chuva observados e projetados no período  $j$ . Um modelo MCG tem um bom desempenho na medida em que o EMA e o REMQ são tão pequenos quanto possível;

$$EMA_t = \frac{1}{t} \sum_{j=1}^t |y_j - \hat{y}_j|, t \leq t_d \quad (4)$$

$$REMQ_t = \sqrt{\frac{1}{t} \sum_{j=1}^t (y_j - \hat{y}_j)^2}, t \leq t_d \quad (5)$$

- Análise estatística – O teste de tendência de *Mann-Kendall* pode evidenciar estatisticamente se o comportamento de precipitação segue uma tendência monotônica, o que significaria uma forte correlação com os efeitos climáticos. Além disso, as estatísticas de *Kolmogorov-Smirnov*, *Anderson-Darling* ou testes similares de ajuste podem garantir que os dados simulados possam ser explicados sob  $GEV(\mu, \sigma, \xi)$ .

Tendo isso em mente, é possível construir curvas de frequência de inundação para cada cenário RCP, denotada aqui como a função de probabilidade *a-priori* ( $\pi_\theta$ ) sob uma perspectiva estacionária. Desse modo, independentemente da perspectiva adotada pelo decisor para modelar os riscos de inundação, a função  $GEV(\mu, \sigma, \xi)$  é a base para estabelecer três cenários distintos de risco, denotados aqui como  $\theta_j$ . A Tabela 5 descreve os níveis de severidade representados por cada cenário.

Estes correspondem a manifestações perceptíveis e nocivas do fenômeno natural no sistema urbano e são baseados nos níveis de gravidade das inundações, nas quais as agências de monitoramento (Defesa Civil) e demais especialistas geralmente classificam em âmbitos regionais.

Tabela 5 – Descrição dos cenários de perigo utilizados para obter probabilidades a-priori nos modelos propostos

Cenário de perigo, $\theta_j$	Descrição	Probabilidade de A-priori, $\pi_\theta$
$\theta_1$ , Estágio de prevenção e monitoramento	O nível de precipitação varia de leve a moderado. Isso leva a pequenas alagamentos na área urbana. Embora o perigo não seja alarmante, inundações causam transtornos. As agências locais de controle e monitoramento monitoram o impacto da	$\pi_{\theta_1}$ tal que $\theta < l_w$

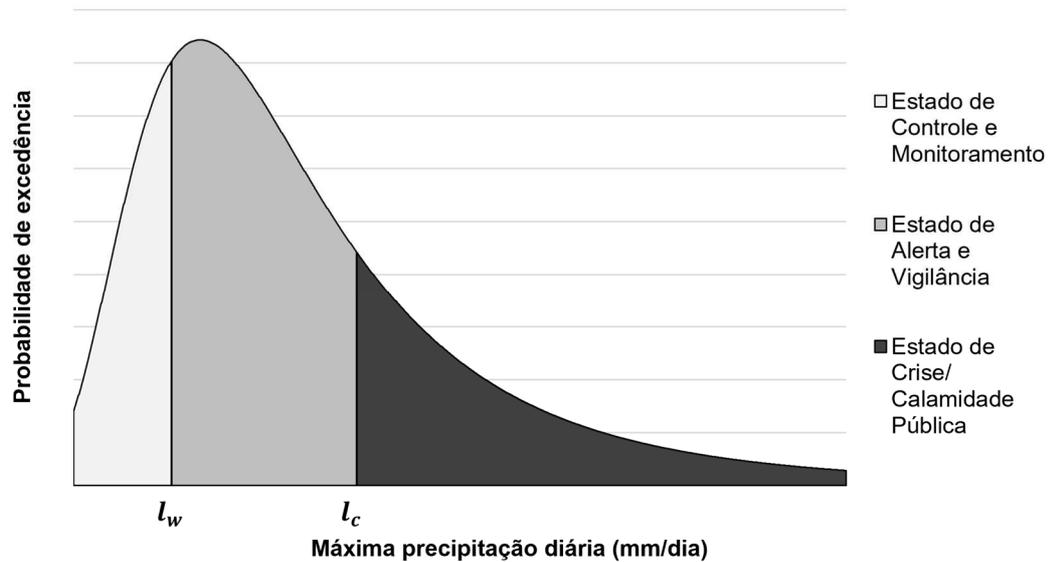
$\theta_2$ , Estágio de alerta	<p>precipitação, que geralmente é tolerável. Áreas ribeirinhas perto de corpos d'água estão inundadas. Estradas urbanas secundárias podem ser bloqueadas, e infraestruturas podem ser submersas. Inundações também podem afetar alguns prédios residenciais ou comerciais de baixa altitude, bem como ciclovias e faixas de pedestres.</p> <p>A intensidade das chuvas é alta, ocasionalmente extrema, o que é caracterizado por níveis intermediários de profundidade da água e uma área considerável é inundada. As principais vias de tráfego urbano podem ser obstruídas. As águas das inundações podem entrar no piso térreo de edifícios residenciais e estabelecimentos comerciais e de serviços. A evacuação das áreas afetadas pode ser necessária. As equipes de emergência atuam diretamente no sistema urbano, uma vez que são percebidos danos a pessoas e ativos.</p>	$\pi_{\theta_2}$ tal que $l_w < \theta < l_c$
$\theta_3$ , Estágio de crise/ calamidade pública	<p>Chuvas extremas causam inundações generalizadas e severas em diversas áreas urbanas, considerável lâmina d'água. O nível de inundação cobre o nível do térreo de muitos edifícios públicos e privados a profundidades acima da altura do tornozelo. Além disso, levam ao fechamento das principais vias urbanas. Os serviços de emergência atuam para evacuar as pessoas e transferir propriedades para elevações mais altas. As lesões aos seres humanos e os danos às condições sanitárias, sociais e econômicas são catastróficos. Falhas nas condições de funcionamento urbano levam os gestores públicos a declarar estado de calamidade pública.</p>	$\pi_{\theta_3}$ tal que $\theta > l_c$

Fonte: O Autor (2022).

Além disso, para apoiar a resolução do problema do decisor, o analista utiliza sua *expertise* para estabelecer dois parâmetros de precipitação diária de água chamados  $l_w$  e  $l_c$ . Estes são definidos após consulta com o decisor, a fim de modelar todos os três cenários de inundação utilizando faixas de precipitação média diária de acordo com características locais do regime hidrológico um outras particularidades, de modo que  $l_w$  e  $l_c$  são considerados como os limites entre os cenários de perigo  $\theta_j$ , cujas lâminas d'água levam aos estados de gerenciamento esquematizados na Figura 4.

Assim, a contribuição dos modelos busca somar as práticas já existentes incorporando elementos hidrológicos e climáticos da inundação já na fase inicial, a fim de modelar estocasticamente os riscos causados pelo evento extremo, que é o foco real da metodologia.

Figura 4 – Análise de frequência de inundações (estimativa de probabilidade) para modelagem de cenários de perigo.



Fonte: O Autor (2022).

Entretanto, é importante pontuar que ambos os modelos não fazem uso obrigatório de ferramentas hidrológicas para simulação do fenômeno natural, muito embora possam ser uma importante fonte para caracterizar o evento de perigo. Dessa forma, é facultado ao decisor a melhor forma de incorporar evidências hidrológicas na estimação dos estados da Natureza.

### 3.1.6 Modelagem de preferências do decisor

A partir de uma investigação acerca da fonte de perigo quando da ocorrência da inundação, as análises de risco a curto e longo prazo propostas neste capítulo insere aspectos subjetivos do decisor, a fim de estabelecer preferências entre os atributos descritos anteriormente. Dessa maneira, a modelagem de preferências é conduzida de modo que leve o decisor a pensar em cada uma das dimensões de risco isoladamente, considerando julgamentos sobre sua deseabilidade frente a consequências adversas sofridas nos cenários de perigo do item 3.1.5. A partir das etapas de avaliação intracritério e intercritério, os modelos buscam priorizar o risco a partir de seus valores agregados, ditos  $r_{a_i}^{global}$ . Para tanto, as Definições 1 e 2 a seguir delineiam a estrutura de preferência ( $>$ ,  $\sim$ ) do decisor sobre o conjunto de zonas urbanas e, assim, parametrizam a priorização do risco de forma coerente.

**Definição 1.** Sejam  $a_i$ ,  $a_j$  duas zonas urbanas diferentes em  $\mathbf{A}$ . Uma relação de preferência ( $>$ ) sobre o conjunto de alternativas é representada pela função de risco  $r_{a_i}^{global}$ ,  $r_{a_j}^{global}: \mathbf{A} \times [t_d] \mapsto [-1,0] \subset \mathbb{R}$  tal que  $a_i > a_j \Leftrightarrow r_{a_i}^{global} > r_{a_j}^{global} \forall a_i, a_j \in \mathbf{A}$ . Essa relação é transitiva, assimétrica e não reflexiva.

**Definição 2.** Sejam  $a_i, a_j$  duas zonas urbanas diferentes em  $\mathbf{A}$ . Uma relação de indiferença ( $\sim$ ) sobre o conjunto de alternativas é representada pela função de risco  $r_{a_i}^{global}$ ,  $r_{a_j}^{global}: \mathbf{A} \times [t_d] \mapsto [-1,0] \subset \mathbb{R}$  tal que  $a_i \sim a_j \Leftrightarrow r_{a_i}^{global} = r_{a_j}^{global} \forall a_i, a_j \in \mathbf{A}$ . Essa relação é transitiva, simétrica e reflexiva.

A seguir, demonstra-se como os modelos de decisão elicitam as preferências do decisor, com vistas a estabelecer a priorização de risco sobre a estrutura ( $\succ, \sim$ ).

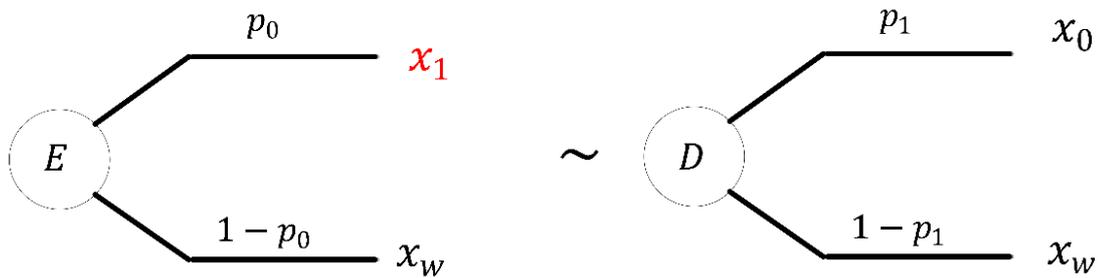
### 3.1.7 Avaliação intra-critério

Esta etapa busca modelar as preferências do decisor a partir da Teoria da Utilidade (KEENEY; RAIFFA, 1976) associada à Análise de Decisão, como abordado por Berger (1985). Aqui, as estimativas probabilísticas da fonte de perigo integradas às modelagens das consequências e suas respectivas utilidades são essenciais para quantificar os riscos ambiental, financeiro, humano, de mobilidade e social. Desse modo, o decisor expressa suas informações preferenciais, que são formuladas matematicamente na forma de uma função de utilidade, denotada como  $u_{atr}(x|\theta)$  e conforme descrito na Definição 3.

**Definição 3.** Seja  $x$  uma consequência em relação a um atributo  $atr$  no conjunto de *payoffs*  $\mathbf{X}$ . Sejam  $x_w$  e  $x^*$  a pior e melhor consequência possível em  $\mathbf{X}$ , respectivamente. Considerando que as preferências são estabelecidas no momento da decisão,  $t = t_d$ , então a função utilidade é representada por  $u_{atr}(x|\theta): \mathbf{X} \times [t_d] \mapsto [0,1] \subset \mathbb{R}$  de modo que  $u_{atr}(x_w|\theta) = 0$  e  $u_{atr}(x^*|\theta) = 1, \forall x \in \mathbf{X}$ .

Desse modo, cabe avaliar, a partir do formato de  $u_{atr}(x|\theta)$ , o comportamento que o decisor possui em relação aos riscos incidentes no contexto de FRM. Para tanto, a elicitacão de acordo com o protocolo de Keeney & Raiffa (1976) busca avaliar o formato das preferências do decisor e, por conseguinte, seu comportamento ao risco. A partir de perguntas realizadas sobre loterias hipotéticas com consequências conhecidas (a exemplo de  $x_w$  e  $x^*$ ) e probabilidades  $p_0, p_1$  previamente determinadas – como esquematizado na Figura 5 –, o decisor deve determinar a consequência  $x_1$  que o torne indiferente entre as loterias esquerda (E) e direita (D). A pergunta pode ser repetida  $m$  vezes, substituindo os valores de consequência com o objetivo de estimar novos valores ( $x_1, \dots, x_m$ ) até que o  $m$ -ésimo passo seja concluído. De acordo com a teoria EU, a indiferença se estabelece pela igualdade entre os valores de utilidade para o conjunto ( $x_0, x_1, \dots, x_m$ ).

Figura 5 – Esquema de elicitación das utilidades unidimensionais com base no protocolo de Keeney & Raiffa (1976).



Fonte: O Autor (2022).

Logo, a partir dos pontos e suas respectivas utilidades, o formato da função utilidade pode ser estimado com base em funções matemáticas usuais, como logarítmica, polinomial etc. Além delas, as preferências podem ser ajustadas às seguintes funções de utilidade, consideradas razoáveis para descrever o comportamento propenso (equação 6) ou avesso (equação 7) do decisor em situações extremas. A proposta de ambas as equações se justifica por meio de estudos experimentais e simulação numérica realizados paralelamente a este trabalho. Entretanto, cabe ao decisor e ao analista determinar a função matemática mais adequada às utilidades elicitadas nesta etapa.

$$u_{atr}(x|\theta) = 1 - \left( \frac{x}{\max(x)} \right)^\alpha \quad (6)$$

$$u_{atr}(x|\theta) = e^{-\alpha x} \quad (7)$$

Como consequência natural, para cada atributo, pode ser calculada a função de perda de uma alternativa  $a_i$ , considerando cada cenário de risco de inundação em  $\theta$ . Assim, uma função de perda significa o valor esperado de utilidade combinando a função consequência  $f_{atr}(x|\theta, a_i)$  e a função de utilidade  $u_{atr}(x|\theta)$ :

$$L_{atr}(\theta_j, a_i) = E_{\theta_j}[u_{atr}(x|\theta)] = - \int_{\theta_j} f_{atr}(x|\theta, a_i) u_{atr}(x|\theta) d\theta \quad (8)$$

Deve-se notar que a formulação de  $L_{atr}(\theta_j, a_i)$  introduz um sinal negativo para as perdas na equação 8 de acordo com Berger (1985), pois o foco da análise de risco está intimamente relacionada à priorização de perda, isto é, em determinar as zonas urbanas mais críticas, ajustando então a interpretação matemática da função utilidade que avalia a incerteza de uma perspectiva de ganho.

Por fim, o risco de inundação uma alternativa na área urbana em estudo, para um dado atributo, pode ser definido pelo valor esperado da função de perda (equação 8): quanto maior esse valor, mais severas as consequências na referida dimensão de análise, como mostrado na equação 9:

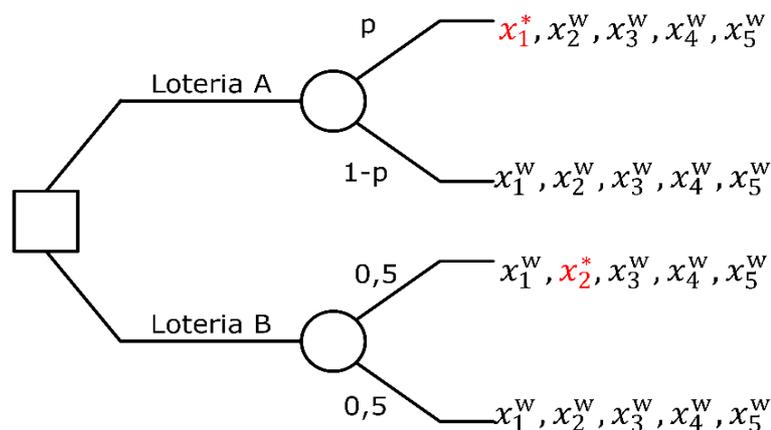
$$r_{a_i}^{atr} = E_{\theta}[L_{atr}(\theta_j, a_i)] = - \sum_{\theta} \pi_{\theta_j} \left[ \int_{\theta_j} f_{atr}(x|\theta, a_i) u_{atr}(x|\theta) d\theta \right] \quad (9)$$

Vale ressaltar que os modelos não quantificam o cenário de normalidade do problema de decisão, uma vez que esse cenário se caracteriza pela ausência de inundação. Então, como não há risco de inundação no cenário de normalidade, este não faz parte da formulação de  $r_{a_i}^{atr}$ .

### 3.1.8 Avaliação intercritério

Com o objetivo de agregar as múltiplas perspectivas de risco em uma única métrica, dita  $r_{a_i}^{global}$ , faz-se necessário obter os valores das constantes de escala, denotados  $k_{atr}$ . Tais parâmetros são obtidos a partir de um protocolo estruturado do MAUT, como visto em Keeney & Raiffa (1976). Em geral, esse processo leva em conta escolhas entre loterias hipotéticas com probabilidades específicas relativas aos melhores e piores *payoffs* em  $\mathbf{X}$ , conforme Figura 6.

Figura 6 – Esquema de elicitação das constantes de escala com MAUT a partir do protocolo de Keeney & Raiffa (1976).



Fonte: O Autor (2022).

Em resumo, o MAUT estabelece a avaliação intercritério, quantificando a compensação que possa haver entre os atributos de decisão, a partir de duas etapas:

- i. O decisor classifica as constantes de escala dos atributos de acordo com sua importância relativa entre si. Este *ranking* é baseado em loterias hipotéticas apresentadas a ele/ela;
- ii. Valores de indiferença entre as loterias A e B (ou seja, determinar a probabilidade  $p$  em que o decisor é indiferente entre elas) levam à criação de relações entre as constantes de escala dos cinco atributos considerados, em pares (veja Figura 6).

Heurísticas introduzidas no algoritmo de eliciação promove uma ordem das perguntas relativas às loterias hipotéticas com consequências conhecidas de modo que sigam a ordem em (i). Assim, cada valor de indiferença significa que uma equação é formada. Assim, forma-se um sistema de equações que permite ao decisor visualizar as constantes de escala,  $k_{atr}$ . Com isso, o decisor está apto a calcular o risco multiatributo das alternativas no item a seguir.

### 3.1.9 Avaliação global das alternativas

Nesta etapa, os modelos realizam a agregação dos múltiplos riscos, com foco na determinação de áreas prioritárias por meio de um *ranking* global de  $r_{a_i}^{global}$ . Para tanto, é importante ressaltar que devem ser detectadas condições de independência em utilidade e aditiva entre os atributos, a fim de justificar a forma analítica de riscos multidimensionais na equação 10. Por exemplo, sejam  $\beta, \gamma$  dois atributos diferentes.

A partir de perguntas relativas a loterias semelhantes às esquematizadas anteriormente,  $\beta, \gamma$  são independentes em utilidade se  $[(x^\beta, x^\gamma), p]$  não sofrer alterações quando  $u_\beta(x|\theta)$  varia, enquanto eles possuem independência aditiva se apenas distribuições de probabilidades marginais influenciam as preferências do decisor sobre as loterias, isto é, não são distribuídas conjuntamente. Assim, obedecer a essas condições subjacentes leva a função  $r_{a_i}^{global}$  a assumir uma forma aditiva e linear, como pode ser visto na equação a seguir.

$$r_{a_i}^{global} = \sum_{atr} k_{atr} r_{a_i}^{atr} = - \sum_{atr} k_{atr} \left\{ \sum_{\theta} \pi_{\theta_j} \left[ \int_{\theta_j} f_{atr}(x|\theta, a_i) u_{atr}(x|\theta) d\theta \right] \right\} \quad (10)$$

A partir daí, o foco está na construção de um relatório de resultados conciso e claro para que a decisão tomada pelo decisor atenda aos objetivos estabelecidos por sua organização no que diz respeito à gestão efetiva do risco de inundação.

Como resultado, de acordo com os riscos globais, o decisor atribui a estrutura de preferências ( $>, \sim$ ) para ordenar as áreas mais críticas no conjunto de alternativas. Assim, o *ranking* de criticidade de risco busca fornecer informações que indiquem a melhor maneira de aprimorar os planos de mitigação de desastres e atender aos objetivos do decisor. A

priorização de risco multiatributo representa, portanto, um meio de gerir e estimar os efeitos climáticos atual e futuro e seus impactos no sistema urbano, seja pelo modelo de curto prazo (DA SILVA et al., 2020) ou longo prazo (DA SILVA; ALENCAR; DE ALMEIDA, 2022a).

No entanto, nesta fase, o foco principal está em mostrar esses dados de uma forma que auxilie o decisor numa compreensão adequada dos riscos. Portanto, o *ranking* de risco de inundação obtido pode não ser suficiente para uma análise satisfatória de risco de inundação percebida considerando o conjunto de alternativas no contexto urbano, uma vez que fornece apenas informação ordinal para a tomada de decisão. Em complemento a isso, cabe investigar a informação cardinal introduzida na equação 10 com a proposição de  $r_{a_i}^{global}$ . Em termos práticos, a escala intervalar de utilidade, descrita com detalhes nas definições 1 e 2, associada a valores pequenos de probabilidade, que por outro lado são associados a consequências de elevada indesejabilidade, pois representem cenários catastróficos relevantes, não facilitam o entendimento da magnitude de risco por parte do decisor, por dois motivos. O primeiro é a associação multiplicativa dessas duas variáveis (probabilidade e consequência) e o segundo motivo é a usual escolha arbitrária da escala de utilidade (0,1), sem significado direto. Para o decisor que deseja comparar as diferentes alternativas seria relevante uma visão relativa entre as zonas urbanas.

Por essa razão, como uma forma alternativa de visualizar os resultados cardinais da análise de risco, o índice de magnitude relativa (IMR), apresentada na equação 11, indica a taxa de crescimento do risco comparando alternativas adjacentes na ordenação de  $r_{a_i}^{global}$ . Essa visão foi proposta em trabalhos anteriores (BRITO; DE ALMEIDA, 2009) e teve sua concepção discutida em de Almeida et al. (2015). Nessa perspectiva, essa visão tem sido usada na literatura. Por exemplo, da Silva et al. (2020) e da Silva, Alencar & de Almeida (2022a) utilizaram as propriedades matemáticas da escala intervalar das funções de utilidade para comparar incrementos de risco em relação às alternativas de menor prioridade no *ranking*. A equação a seguir mostra como essas razões de incremento são calculadas:

$$IMR_{a_i|z} = \frac{r_{a_i|z}^{global} - r_{a_i|z+1}^{global}}{r_{a_i|z+1}^{global} - r_{a_i|z+2}^{global}}, z \leq N - 2 \quad (11)$$

Assim, assumir que a zona urbana  $a_i$  ocupa a  $z$ -ésima posição no *ranking*, o  $IMR_{a_i|z}$  significa quantas vezes  $a_i$  é mais crítica para uma zona urbana adjacente na posição  $z + 1$ . Isso revela o quão próximas ou distantes das outras são as magnitudes de risco. Da Silva, Alencar & de Almeida (2022a) afirmam que isso pode ajudar o decisor a alocar de modo mais eficiente recursos sob escassez.

Para uma melhor percepção dos riscos envolvidos, pode-se explorar ferramentas de visualização de risco multidimensional, uma vez que o uso de elementos visuais é uma prática comprovadamente útil para atingir esse objetivo (EPPLER; AESCHIMANN, 2009). Assim, este trabalho aplica uma análise espacial e visual utilizando técnicas de georreferenciamento e mapeamento do risco.

### *3.1.10 Análise de sensibilidade e robustez, análise dos resultados e elaboração de recomendação para o decisor*

Os relatórios de saída dos modelos de risco também podem incluir o uso de análises estatísticas, gráficas e de desempenho de risco para lidar com a incerteza na avaliação dos riscos de inundação, considerando a variabilidade climática, das consequências e das atitudes de risco do decisor, conforme abordado no item a seguir. Diante disso, o procedimento de Análise de Sensibilidade (AS) é uma ferramenta adequada para investigar o grau de incerteza observado na definição dos parâmetros-chave de modelos de decisão, inclusive em MCDM/A (FERRETTI; SALTELLI; TARANTOLA, 2016; SALTELLI et al., 2008). Seja por falta de conhecimento ou ausência de dados precisos, as variações dos valores de entrada afetam a avaliação de risco (BASTOLA; MURPHY; SWEENEY, 2011; LIU et al., 2018b; MEDEIROS; ALENCAR; DE ALMEIDA, 2016, 2017; VIANA et al., 2021; XING et al., 2021). Consequentemente, a AS visa avaliar a robustez da priorização de risco estabelecida na etapa anterior pelos modelos amplamente discutidos até aqui.

Apesar do uso crescente de técnicas locais e globais de AS em diversos contextos, Saltelli et al. (2019) mostrou em seu estudo que a maioria dos trabalhos neste tema não implementa corretamente a metodologia devido a razões técnicas como a suposição da linearidade e a ineficiência do processo, mostrando que muitos artigos geralmente confundem a AS e a análise da incerteza. Além disso, os autores mencionaram que, embora muitos trabalhos tendam a replicar procedimentos complexos encontrados em artigos altamente relevantes, alguns deles carecem de rigor metodológico, o que pode impactar a qualidade da AS. Assim, a AS tem o potencial de contribuir para a análise de risco se aplicada corretamente e com base em métodos bem estabelecidos.

Nesse sentido, esta etapa gera 6 padrões de simulação, conforme esquematizado na Tabela 6.

Ao considerar a tradicional Simulação de Monte Carlo (SMC), a Tabela 6 apresenta um protocolo de análise de sensibilidade bem definido, incorporados aos modelos de risco de inundação, dividindo os parâmetros de entrada em três grupos. Eles indicam a influência da

variabilidade climática, exposição e as preferências sobre credibilidade da ordenação dos riscos.

Tabela 6 – Esquema dos principais pressupostos para variações de entrada na AS

Componentes de variação	Cenário	Descrição	Parâmetros-chave de entrada da AS		
			Variabilidade climática	Exposição	Preferência
Mudança climática (padrão de precipitação)	Atual	Modelagem tradicional com base apenas em registros históricos	✓		
	Futuro/ RCP 4.5	Cenário climático otimista de estabilização (IPCC)	✓		
	Futuro/ RCP 8.5	Cenário climático pessimista ( <i>business-as-usual</i> ) (IPCC)	✓		
Grau de incerteza	B: Baixo	Faixa de variação em 5%; Projeções climáticas em 90% de confiança.	✓	✓	✓
	A: Alto	Faixa de variação em 10%; Projeções climáticas em 95% de confiança.	✓	✓	✓
Modelagem de incerteza com PDF	U: Uniforme	Distribuição uniforme sob limites inferiores e superiores	✓	✓	✓

Fonte: O Autor (2022).

A notação adotada neste trabalho, para cada padrão, caracteriza cada elemento de variação na AS. Por exemplo, o padrão de simulação 4.5\_B\_U indica, no cenário futuro de estabilização do GEE, variações de entrada que ocorrem de acordo com uma distribuição uniforme em baixo grau de incerteza.

Desse modo, o procedimento de AS compreende o risco de inundação multiatributo e suas implicações na priorização de zonas urbanas, especificamente a sensibilidade/ robustez do *ranking* inicial obtido como base, a partir do modelo adotado. Isso é realizado por meio de inferência estatística e análise de simulação, compondo uma etapa importante da gestão de riscos. Ferramentas estatísticas com o  $\tau$  de *Kendall*, vide equação 12, podem evidenciar associações monotônicas entre o *ranking* simulado e o original (FOSTER; MCGILLIVRAY;

SETH, 2013). O cálculo de  $\tau$  é feito a partir da comparação entre os postos simulado e original para cada posição do *ranking*, até a N-ésima posição, em que C corresponde ao número de postos concordantes (pares que obtiveram mesma ordem natural), caso contrário são contabilizados os postos discordantes (D).

$$\tau = \frac{C - D}{\frac{1}{2}N(N - 1)} \quad (12)$$

Em comparação com outros métodos de correlação, o coeficiente não paramétrico de *Kendall* é frequentemente utilizado na literatura e fornece resultados confiáveis com intervalos de confiança que são fáceis de interpretar (PUTH; NEUHÄUSER; RUXTON, 2015). Sob essa perspectiva, os *rankings* de risco para o conjunto de zonas urbanas em estudo são então comparados usando ferramentas de visualização estatística e gráfica. Em conjunto, a análise integrada busca fornecer uma vasta gama de informações que auxiliem o decisor a optar por seguir a recomendação inicial ou fazer alterações adicionais no ordenamento, de acordo com a incerteza envolvida. Assim, dados gráficos e tabulares fornecem:

- uma análise descritiva dos valores de Kendall para inferir a robustez dos resultados. Usando este parâmetro, para um determinado nível de confiança, pode ser analisado se as classificações simuladas apresentam uma relação monotônica com as originais. Assim, valores mais elevados de  $\tau$  evidenciam uma correlação positiva com o *ranking* original no cenário climático tratado no padrão de simulação. Portanto, uma investigação aprofundada de quais fatores diminuem o coeficiente esclarece as principais preocupações sobre as quais os gestores públicos devem lidar no futuro;
- um relatório de simulação sobre as zonas urbanas mais sensíveis nos *rankings*. Isso é crucial para cruzar os resultados da análise anterior a fim de determinar, em um grau específico de incerteza, quais componentes de risco têm contribuído mais para essa sensibilidade. Oferece ao decisor a possibilidade de revisar a recomendação de decisão após a implementação de suas políticas associadas ao FRM.

Para tanto, ferramentas gráficas, de simulação e estatísticas são usadas para evidenciar de forma inovadora os fatores-chave de influência e quais circunstâncias levam os decisores a tomar decisões críveis. Esta é uma informação valiosa que o decisor pode usar para tornar mais consolidada a sua decisão. O decisor consegue melhorar sua visão sobre a análise de riscos cruzando os dados sobre risco e incerteza, dando assim uma resposta razoável às limitações apontadas por Aven (2019), quando da modelagem de riscos climáticos.

### 3.1.11 Implementação da decisão

Enquanto último passo dos modelos propostos, após avaliar quais são os riscos de inundação na área urbana, um plano de monitoramento pode ser implementado para projetar, planejar e executar ações estratégicas que auxiliarão o decisor a mitigar o impacto desses eventos e, portanto, os danos que isso pode causar. Esta etapa envolve a participação conjunta dos atores, como comunidades científicas, empresas, população local e administração pública para que possam entender o quão importantes e necessárias são as demandas por medidas estruturais e não estruturais para combater as inundações. Esta etapa também apoia a dinâmica de alocação de recursos e elaboração de projetos de manutenção para áreas afetadas pelo desastre natural, aumentando assim a resiliência dos espaços urbanos frente às mudanças climáticas.

Por fim, muitos *stakeholders* podem utilizar as informações fornecidas pelos modelos propostos para melhorar os procedimentos de gerenciamento de inundações, portanto, os benefícios da aplicação desse modelo são compartilhados com todos. Nesse sentido, isso ocorre dentro de um processo de aprendizagem contínuo que permite aos gestores, antes e depois da aplicação dos modelos, melhorar as técnicas atuais de FRM. A análise de risco cíclica (reaplicação dos modelos de forma periódica) pode ser abordada como um processo de conhecimento, durante o qual novas informações sobre parâmetros e modelagem podem ser atualizadas a fim de melhorar os planos de contingenciamento e mitigação. Desse modo, a avaliação de risco, na prática, pode fundamentar importantes decisões-chave no processo de gestão de desastres, como:

- Aceitar o risco: não há nenhuma ação a ser implementada, pois leva muito tempo para preparar uma estratégia para gerenciar alguns danos causados por enchentes ou porque ações de alto custo serão necessárias para lidar com isso, ou pode até ser que o risco representado por uma inundação seja tolerável;
- Transferir sua responsabilidade para gerenciamento do risco de inundação: terceirizar ou compartilhar riscos com terceiros ou aqueles que tem capacidade técnica ou competência jurídica para gerenciar o resultado;
- Implementar políticas para eliminar/mitigar o risco de inundação: medidas são tomadas para eliminar as causas das ameaças sempre que possível; reduzir a probabilidade de ocorrência do risco ou as consequências resultantes.

Consequentemente, as práticas de gestão de risco de inundação (FRM) devem ser eficazes na redução substancial das causas e na mitigação de seus impactos futuros

simultaneamente para que a FRM busque garantir o funcionamento dos espaços urbanos em níveis aceitáveis.

Nesse contexto, é importante que esta tese utiliza, como contribuição adicional às práticas de FRM, um Sistema de Apoio a Decisão (SAD) desenvolvido pelos grupos de pesquisa CDSID e REASON que implementa as metodologias outrora apresentadas (DE ALMEIDA; DA SILVA; ALENCAR, 2022). A partir de uma ampla exploração de funcionalidades, o produto tecnológico busca encorajar os setores da sociedade em aplicar os modelos de análise de risco diante de um cenário climático vigente e complexo. Este sistema será oportunamente apresentado no capítulo 5.

### 3.2 Aplicação numérica em uma região político-administrativa da cidade do Recife (Pernambuco)

Nesta seção, serão aplicados os modelos estacionários de avaliação multiatributo de risco sob as perspectivas de curto e longo prazo usando MAUT e Análise da Decisão, no sentido de validar suas potenciais contribuições apontadas ao longo deste capítulo. Para tanto, o SAD *Flood MATTERS* será usado como base para instrumentalizar o processo de cálculo e análise detalhada dos riscos envolvidos, em prol de uma tomada de decisão consistente (DE ALMEIDA; DA SILVA; ALENCAR, 2022), cujas funcionalidades serão detalhadas no capítulo 5.

Através de bases de dados abertas, relatórios de acidentes locais e informações contidas em relatórios e em planos de contingenciamento local, as aplicações numéricas abaixo descritas são baseadas em dados realísticos, desde a construção dos atributos, alternativas e outros fatores que permitam ao sistema avaliar a criticidade de risco no contexto de FRM.

#### 3.2.1 *Descrição do problema*

O local do estudo compreende a cidade de Recife, capital do estado de Pernambuco. Ele cobre cerca de 218,4 km<sup>2</sup>, e cerca de 1,54 milhão de pessoas vivem nesta área, de acordo com o último censo. Diversos fatores geográficos e históricos dificultam a capacidade de drenagem do Recife, que inclui parte da cidade não estar a mais de 4 metros acima do nível do mar, a influência das marés, um sistema de águas subterrâneas muito próximo à superfície, bem como um histórico de verticalização urbana perto das margens dos rios e morros e a canalização de corpos d'água. Consequentemente, eventos hidrológicos como as inundações são recorrentes na região. A administração local detectou cerca de 160 pontos de alagamentos

na cidade, revelando um patamar de quase 52% da população da cidade presente em áreas que tendem a ser inundadas em dias chuvosos (ICLEI, 2020).

É importante ressaltar que inundações severas e deslizamentos de terra nessas áreas são agravados também por consequências decorrentes de questões sociais. Por exemplo, morros e encostas são frequentemente ocupadas, legalmente ou não, cujas construções estão presentes muitas vezes em locais inseguros (instáveis). Como a população que reside nessas áreas é predominantemente mais carente, as casas são autoconstruídas, geralmente de baixo padrão de construção e muitas vezes há falta de serviços básicos de infraestrutura, incluindo sistemas de esgotamento sanitário, sistemas de drenagem bem conservados e estradas pavimentadas ou galerias. Esse conjunto de fatores torna essas áreas da cidade ainda mais expostas aos efeitos climáticos.

Em face deste problema histórico na cidade, o plano local de ação para a gestão climática foi analisado para estruturar a implementação de medidas de adaptação climática e redução de riscos, tendo em vista que as restrições financeiras compreendem o principal obstáculo à proposta de soluções sustentáveis. Nesse contexto, os modelos propostos na seção 3.1 podem ajudar na tomada de decisões de curto e longo prazo, com base na avaliação de riscos sob efeitos climáticos atual e futuro.

Essa aplicação numérica se concentra em uma área geográfica particular do Recife, codificada Região Político-Administrativa 5 (RPA-5), em que os eventos de inundação são impulsionados pela bacia do rio Tejipió e consiste em 16 bairros modelados como alternativas do problema. Como explicado na seção 3.1, o decisor é capaz de prever riscos de inundação combinando informações atuais com cenários climáticos.

### *3.2.2 Análise hidrológica da inundação com apoio de projeções climáticas*

Este estudo de caso realístico utilizou dados públicos e de acesso aberto disponibilizados por órgãos locais e institucionais para simular o impacto das inundações, em termos de risco, a curto prazo (2021) e também para os próximos 80 anos (2021 – 2100) aplicando os modelos de da Silva et al. (2020) e da Silva, Alencar & de Almeida (2022a). Assim, a primeira fase dos modelos inclui uma análise da frequência de enchentes.

A partir de uma análise dos impactos climáticos no tempo atual, os dados históricos relativos às estações meteorológicas do Recife desde 1965 (APAC, 2021) auxiliaram o analista a ajustar os parâmetros da equação 3 para o local de estudo. Nesse sentido a distribuição  $GEV_{atual}(29,01; 22,34; 0,23)$  representa o regime pluviométrico vigente,

considerando os efeitos climáticos correlacionados até 2021 e admitindo, sob nível de confiança de 95%, que os dados se ajustam adequadamente a distribuição GEV.

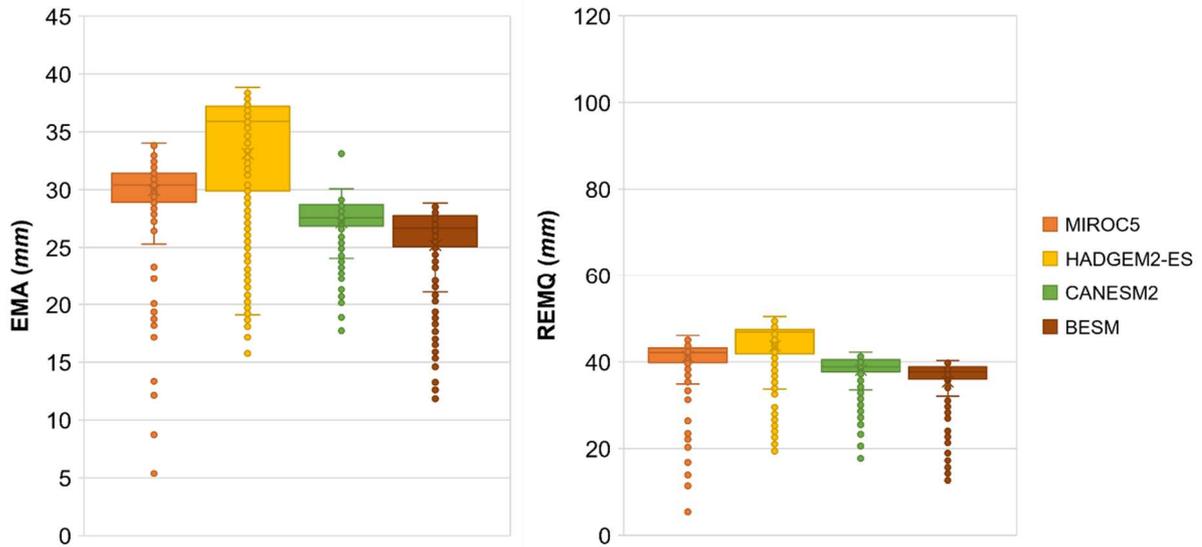
Ademais, coube ao analista, com o aval do decisor, definir os parâmetros  $l_w = 18,6$  mm e  $l_c = 55,3$  mm, limites entre os níveis de severidade (cenários de perigo, em termos de precipitação) detalhados na Figura 4. Tais parâmetros foram estimados com base nos critérios de classificação de eventos hidrológicos usualmente emitida por órgãos de Defesa Civil em diversas cidades do país. Dessa forma, foi possível estimar as probabilidades dos cenários de perigo, estabelecendo para cada cenário  $\theta_j$  a distribuição de probabilidade a-priori  $\pi_{\theta}$ , tais como:  $\pi_{\theta_1}^{atual} = 0,1947$ ,  $\pi_{\theta_2}^{atual} = 0,5083$  e  $\pi_{\theta_3}^{atual} = 0,2969$ . Para uma melhor compreensão dos resultados, a notação  $\pi_{\theta_j}^{atual}$  indica as probabilidades dos cenários de perigo associadas à previsão de inundação cujos efeitos climáticos incidem até 2021.

Por outro lado, o modelo de longo prazo permite fazer, de forma análoga, a previsão do regime hidrológico até 2100, numa perspectiva a longo prazo. Para tanto, a partir da simulação de dados de chuvas diárias máximas em um mês (mm), os modelo analisa o desempenho dos quatro modelos climáticos expostos na Tabela 4: BESM (NOBRE et al., 2013), CANESM2 (ARORA et al., 2011), HADGEM2-ES (COLLINS et al., 2011) e MIROC5 (WATANABE et al., 2010). Mais detalhes estão disponíveis na plataforma PROJETA do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (CPTEC/INPE, 2021).

Para a realização da análise futura, os dados simulados de 1969 a 2005 foram comparados aos registros históricos de chuvas medidos pelas estações pluviométricas do Recife (APAC, 2021). Eventuais falhas nos registros (ausência de dados ou postos nulos) devido à ausência de observador ou defeitos nos aparelhos de medição pluviométrica foram corrigidos conforme a média aritmética de postos vizinhos. Com a ajuda de analistas, o desempenho dos MCGs ao longo do tempo foi medido com índices EMA e REMQ, como revela a Figura 7.

O gráfico de *boxplot* evidencia que a menor mediana dos índices de erro médio absoluto e erro médio quadrático, com seus respectivos intervalos interquartis, sugerem o modelo climático BESM como aquele que mais simula adequadamente o regime de precipitação do Recife. Deve-se notar também que o teste de tendência de *Mann-Kendall* foi aplicado a todos os MCGs, mostrando, assim, a um nível de confiança próximo a 90%, uma clara tendência monotônica dos registros de precipitação; isto indica uma clara correlação entre a frequência de inundação e os efeitos climáticos. Testes de aderência do tipo K-S também evidenciaram um bom ajuste dos registros pluviométricos à distribuição GEV.

Figura 7 – Gráfico de boxplot com índices de desempenho dos MCGs utilizando a plataforma PROJETA (CPTEC/INPE, 2021).

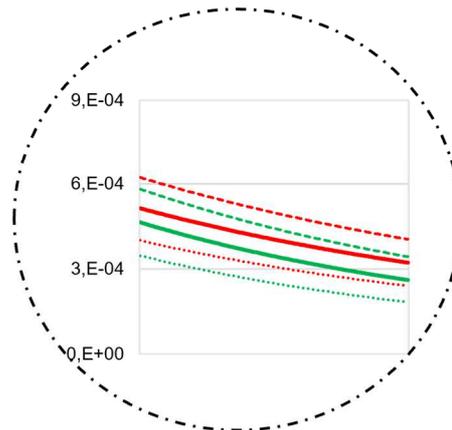
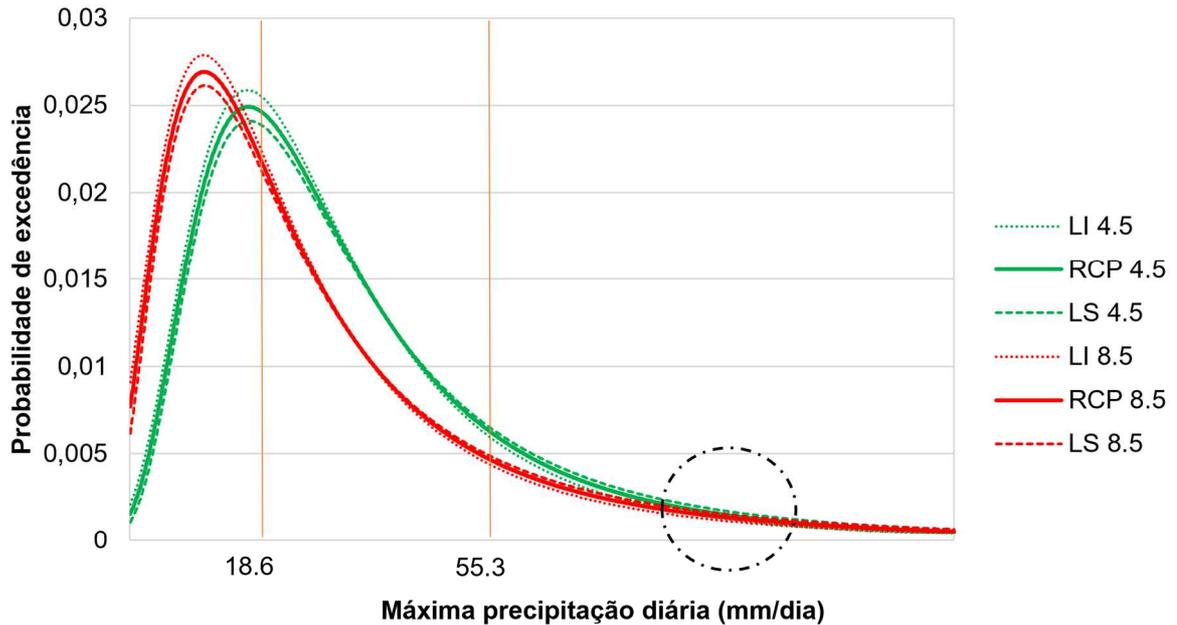


Fonte: O Autor (2022).

Desse modo, ao considerar o modelo climático escolhido para simular as futuras fontes de perigo, o BESM utiliza uma técnica de *downscaling* para regionalizar a projeção climática, incorporando processos de formação de nuvens, dinâmicas vegetais e características locais dos biomas brasileiros. A partir dos cenários climáticos RCP 4.5 e RCP 8.5, padronizados pelo IPCC, executou-se o modelo de previsão para obter registros mensais de precipitação diária máxima até 2100, cujos dados foram ajustados à função distribuição:  $GEV_{RCP\ 4.5}(21,59; 15,32; 0,28)$  e  $GEV_{RCP\ 8.5}(15,97; 14,76; 0,42)$ . Sendo assim, as probabilidades a-priori  $\pi_{\theta}$  obtidas após as simulações climáticas são dispostos a seguir:  $\pi_{\theta_1}^{RCP\ 4.5} = 0,2945$ ,  $\pi_{\theta_2}^{RCP\ 4.5} = 0,5340$  e  $\pi_{\theta_3}^{RCP\ 4.5} = 0,1655$ ;  $\pi_{\theta_1}^{RCP\ 8.5} = 0,4307$ ,  $\pi_{\theta_2}^{RCP\ 8.5} = 0,4160$  e  $\pi_{\theta_3}^{RCP\ 8.5} = 0,1533$ .

A Figura 8 esquematiza o ajuste da curva aos cenários RCP; além disso, o erro padrão de  $\xi$ ,  $\sigma$ ,  $\mu$  e permitiu estabelecer limites inferiores (LI) e superiores (LS) a um nível de confiança de 95% de seus parâmetros. A partir de uma análise crítica da Figura 8, pode-se entender como esses cenários climáticos afetam os impactos ambientais de todo o sistema urbano. Embora tenham um formato semelhante, a diferença entre eles está concentrada na tendência central dos registros diários de precipitação. Graficamente, nota-se que a projeção RCP 8.5 concentra a probabilidade de inundação nos extremos (precipitações muito leves ou extremas). De fato, isso ocorre porque esse cenário lida com um aumento contínuo da emissão de GEE que se segue ao aumento projetado da população global.

Figura 8 – Gráfico com os regimes de precipitação até 2100 conforme as projeções RCP 4.5 e 8.5 com o modelo climático BESM.



Fonte: O Autor (2022).

Por outro lado, o cenário de estabilização (RCP 4.5) assume um aumento gradual das emissões de GEE até meados do século, seguido de uma diminuição. Essas diferenças são reforçadas pelo detalhe no gráfico: em taxas mais altas nos registros pluviométricos, projeções mais altas de GEE implicam que os extremos pluviométricos serão mais recorrentes. Em um intervalo de confiança de 95%, a Figura 8 modela a incerteza em relação à previsão de chuvas sob limites LI e LS, interpretando-os como evidência de que o limite inferior favorece chuvas menos intensas, enquanto o limite superior permite maiores probabilidades de precipitações pesadas ou excepcionais.

### 3.2.3 Estimação das funções consequência e modelagem de preferências do decisor

Enquanto fonte de perigo, a precipitação ( $\theta$ ) atua de forma direta e indireta na perturbação do sistema urbano, de modo que as funções consequência representam as perdas estimadas de cada alternativa em cinco critérios: ambiental, financeiro, humano, de mobilidade e social. Cada um deles está bem definido e suas informações básicas sobre sua modelagem probabilística são dadas na Tabela 7. Ela mostra que a modelagem das funções de consequência é personalizada, por isso é importante integrar conhecimento especializado com o decisor para avaliar o que causa as inundações e, conseqüentemente, o nível de danos relacionado a esses “gatilhos”. Aqui, é importante reforçar as premissas feitas pelos modelos, que assumem independência de probabilidades entre as zonas urbanas para que não haja propagação de acidentes ou consequências entre regiões adjacentes.

Tabela 7 – Parâmetros-chave para mensuração de  $f_{atr}(x|\theta, \alpha_i)$  e resultados da elicitación de preferências do decisor com MAUT

Parâmetro/ Função	Atributos				
	Ambiental/ Sanitário	Financeiro	Humano	Mobilidade	Social
Dano mínimo <sup>1</sup>	0	0	0	0	0
Dano máximo <sup>1</sup>	5000	19.000,00	15	100	20
Unidade de danos	Concentração de patógeno <sup>2</sup> (µg/ml)	Custo médio por área (R\$/ hec)	Número médio de fatalidades	% de redução de velocidade em via arterial	Número médio de domicílios afetados
Atitude de Risco	Propenso	Averso	Averso	Neutro	Neutro
Função de consequência	<i>BetaPoisson</i> ( $N_{50}, \alpha$ ) <sup>2</sup>	<i>Lognormal</i> ( $\mu, \sigma$ )	<i>Poisson</i> ( $\lambda$ )	<i>Beta</i> ( $\alpha, \beta$ )	<i>Poisson</i> ( $\lambda$ )
Constante de escala com MAUT	0,127	0,095	0,350	0,247	0,181
Base de dados	Acordos climáticos locais, jornais e relatórios de desastres de inundações (ICLEI, 2020; MUNICÍPIO DO RECIFE, 2019) Fonte: O Autor (2022).				

Por fim, as preferências do decisor são essenciais para avaliar suas atitudes em relação ao risco, especificamente na forma de utilidade e na obtenção de  $k_{atr}$  com MAUT. Da mesma forma, a independência aditiva e de utilidades são satisfeitas para credenciar o MAUT como um método multiatributo para agregar riscos atuais e futuros. A dinâmica no estabelecimento de suas preferências devido à incerteza durante o processo de obtenção desempenha um papel

<sup>1</sup> Por zona urbana (alternativa).

<sup>2</sup> Concentração de *Leptospira Pomona*: *Leptospirose*:  $N_{50} = 353$ ;  $\alpha = 1,336$ .

importante na credibilidade dos *rankings* de risco. A partir dos dados da Tabela 7, as preferências são modeladas utilizando funções de utilidade como proposto em da Silva et al. (2020). Originalmente, o decisor é avesso ao risco para os atributos financeiro e humano, enquanto para os demais ele apresenta um comportamento aproximadamente neutro. Uma análise atente à tabela anterior destaca um curioso comportamento ao risco na dimensão ambiental/ sanitária, que é predominante propenso. Embora não seja usual, tal comportamento diante de situações catastróficas se justifica pelo aparato em que a administração pública possui, até então, para combater os efeitos indesejados na esfera de saúde pública. Nesse sentido, ao aplicar o protocolo de Keeney & Raiffa (1976) a tabela também sumariza os valores das constantes de escala  $k_{atr}$ , utilizados como base para o cálculo dos riscos.

### 3.2.4 Priorização de áreas urbanas com base no risco multidimensional

A partir da combinação das constantes de escala, funções consequência e modelagem probabilística da fonte de perigo, foi possível calcular as perdas e os riscos unidimensionais de cada alternativa, agregadas em uma única métrica com o objetivo de atribuir prioridades às diversas zonas urbanas. A Tabela 8 sumariza as principais informações, ordinais e cardinais, obtidas com a priorização dos modelos de risco apresentados neste capítulo.

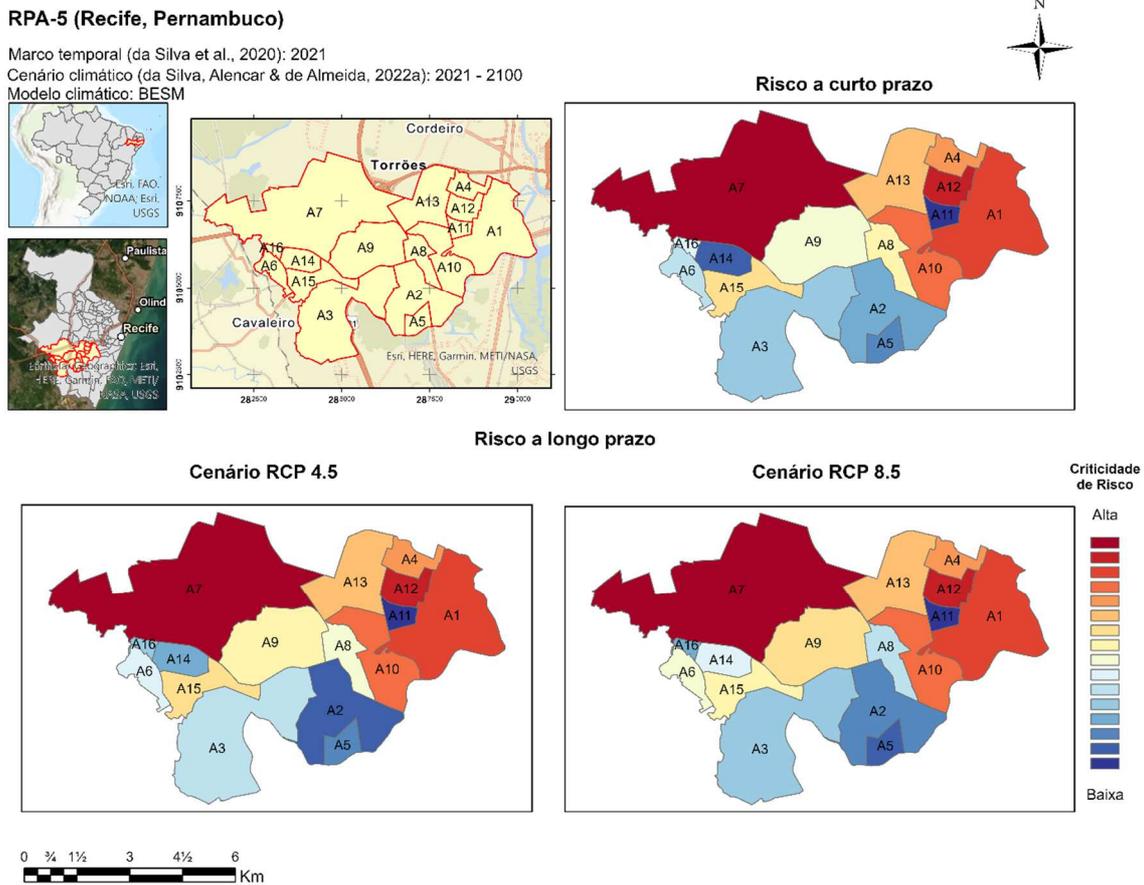
Tabela 8 – Ranking de risco de inundação urbana: análise a curto prazo (DA SILVA et al., 2020) e longo prazo (DA SILVA; ALENCAR; DE ALMEIDA, 2022a) com seus respectivos índices de magnitude relativa

Posição no <i>ranking</i>	Modelo de risco a curto prazo (2021)		Modelo de risco a longo prazo (2021-2100)			
	Zona urbana	IMR	RCP 4.5: Estabilização		RCP 8.5: <i>Business-as-usual</i>	
			Zona urbana	IMR	Zona urbana	IMR
1	$a_7$	6,06	$a_7$	6,51	$a_7$	6,95
2	$a_{12}$	1,41	$a_{12}$	1,50	$a_{12}$	1,14
3	$a_1$	0,18	$a_1$	0,07	$a_1$	0,04
4	$a_{10}$	2,03	$a_{10}$	5,29	$a_{10}$	9,07
5	$a_4$	11,58	$a_4$	12,23	$a_4$	7,11
6	$a_{13}$	1,08	$a_{13}$	0,36	$a_{13}$	3,33
7	$a_{15}$	0,41	$a_{15}$	1,49	$a_9$	0,21
8	$a_8$	3,52	$a_9$	3,86	$a_{15}$	3,40
9	$a_9$	0,72	$a_8$	1,70	$a_6$	4,30

10	$a_{16}$	8,31	$a_6$	1,26	$a_{14}$	0,40
11	$a_6$	0,06	$a_3$	0,26	$a_8$	0,41
12	$a_3$	5,04	$a_{16}$	0,35	$a_3$	0,44
13	$a_2$	0,85	$a_{14}$	6,52	$a_{16}$	13,93
14	$a_5$	0,11	$a_5$	0,32	$a_2$	0,06
15	$a_{14}$	-	$a_2$	-	$a_5$	-
16	$a_{11}$	-	$a_{11}$	-	$a_{11}$	-

Fonte: O Autor (2022).

Figura 9 – Localização do estudo de caso e mapeamento de risco multidimensional de inundação urbana do Recife (RPA-5) para 2021 e 2021 – 2100 nos cenários RCP 4.5 e 8.5.



Fonte: O Autor (2022).

Sob um viés estacionário, a análise de risco é composta pela informação ordinal (isto é, o *ranking* propriamente dito), além do IMR para introduzir interpretações sobre a magnitude relativa de riscos entre as alternativas do problema. A escala intervalar das funções utilidade permitiu que os incrementos de risco fossem comparados em relação às áreas de risco nas posições mais baixas no ranking. Isso potencializa a forma como a intensidade e priorização dos riscos são interpretados, mapeados e percebidos pelo decisor, como visto na

Figura 9.

Nesse sentido, cabe ressaltar os benefícios no uso do SAD *Flood MATTERS*, ao proporcionar uma melhor percepção da situação de risco, explorando espacialmente as informações estratégicas da ordenação obtida, a fim de apoiar o processo de tomada de decisão. Assim, as saídas dos modelos foram integradas às técnicas GIS, que permitiram a visualização dos mapas de risco de inundação na figura anterior.

### 3.2.5 Resultados e discussão

Observe que o mapeamento de risco aplicado a este modelo utilizou um gradiente de cor para representar o *ranking* de risco em relação a sua criticidade global. Para o mapeamento de risco multiatributo, isto é, sua informação ordinal, as cores "mais quentes" (próximas ao vermelho) representam alternativas (ou zonas urbanas) com maior prioridade de risco de inundação, enquanto as cores "mais frias" (próximas ao azul) representavam alternativas com menor prioridade. Adicionalmente, a informação cardinal com  $IMR_{a_i}$  pode contribuir para a construção do mapeamento de risco, ao estabelecer a diferença de tonalidade entre as cores-alvo da ordenação.

Ao combinar diferentes formas de analisar prioridades de risco, entre questões ambiental, financeira, humana, de mobilidade e social, ambos os modelos estacionários buscam ajudar o decisor a compreender detalhadamente como a análise de risco de inundação auxilia no planejamento da mitigação de um desastre local, alocando melhor os recursos disponíveis para implementar ações preventivas e mitigadoras em áreas de alta prioridade. O geoprocessamento de informações de risco de inundação ajuda o decisor a analisar o layout geográfico desses dados. Além disso, a análise espacial indica como as medidas de mitigação a serem implementadas também podem mitigar os impactos dos desastres hidrológicos em áreas vizinhas, uma vez que as zonas urbanas têm uma relação dinâmica em relação ao seu funcionamento urbano.

Uma interpretação prática dos mapas de risco dispostos na

Figura 9 pode ser exemplificada para o *ranking* da análise de risco atual (curto prazo). Com base nisso, parece que os recursos disponíveis devem ser alocados primeiro para a alternativa  $a_7$ ,  $a_{12}$  e depois seguidos por  $a_1$ ,  $a_{10}$  e assim por diante. Aqui, portanto, o ponto central está em encontrar a melhor maneira de reduzir os riscos de inundação levando em conta as restrições enfrentadas pelo decisor ao alocar recursos financeiros, técnicos e humanos para implementar ações de mitigação.

Entretanto, deve-se notar que no mapeamento não há classificação de alternativas; elas retratam apenas a ordenação de acordo com a avaliação de risco. Também não é correto afirmar, pelo mapeamento, que as alternativas de menor criticidade possuem, necessariamente um risco baixo; isto deve ser analisado de forma cuidadosa com a interpretação do IMR.

A forte cardinalidade – considerando o comportamento do decisor e proporcionada pela função utilidade – permitiu aos modelos inserir uma medida de comparação entre as magnitudes de risco com o IMR. Por exemplo, considere o *ranking* com o cenário climático RCP 8.5 na Tabela 8. As alternativas  $a_{10}$  e  $a_4$  são próximas umas das outras, com alta prioridade. Adicionalmente, o decisor pode visualizar com o IMR que o risco associado à  $a_{10}$  é quase 10 vezes maior que o risco de  $a_4$ . Como os recursos são escassos, a análise discutida anteriormente pode ser um "divisor de águas" ou uma justificativa plausível usada pelo decisor para realizar ajustes em sua alocação de recursos financeiros, materiais e humanos.

Como exemplo, suponha que o decisor destine recursos para,  $a_7$ ,  $a_{12}$ ,  $a_1$ ,  $a_{10}$  e ainda possua um montante para continuar essa alocação. Em seguida, informações sobre a magnitude relativa de risco com o IMR ajudam o decisor a decidir corretamente se vale a pena continuar distribuindo recursos disponíveis para as alternativas remanescentes no ranking, ou se é melhor parar a alocação a partir daí, como uma decisão estratégica para melhor adaptação climática.

Por outro lado, considere no mesmo ranking as relações de magnitude de risco entre as alternativas  $a_1$  e  $a_{10}$ . O baixo patamar de IMR revela que os respectivos impactos de risco não são significativamente diferentes uns dos outros, uma conclusão que também pode ser traçada na comparação de outros pares de alternativas adjacentes neste ranking, como  $a_2$  e  $a_5$ .

Assim, uma interpretação crítica dos resultados do modelo contribui para a elaboração de ações de mitigação e, assim, para a alocação de recursos de forma eficiente quanto às restrições de recursos do poder público local. Mapear o risco de inundações com georreferenciamento fornece uma riqueza de informações que podem apoiar a decisão do gestor no final do processo; logo, as ferramentas de visualização de riscos não só aumentam a credibilidade dos modelos propostos, mas também garantem que todos os atores entendam corretamente as particularidades do problema da decisão.

Entretanto, é importante notar a diferença entre os *rankings* obtidos na Tabela 8 e na

Figura 9. Segundo os modelos, dependendo do nível GEE e do horizonte de previsão do fenômeno climático, as alternativas podem mudar suas prioridades no *ranking*. Isso revela, pelo menos preliminarmente, que o clima desempenha um papel vital no direcionamento da gestão de riscos do local em estudo. Em seguida, a AS investigará quais fatores influenciam a

robustez da recomendação dos modelos e como novas informações podem contribuir para o aprimoramento da tomada de decisões.

As priorizações de risco de inundação estabelecidas na Tabela 8 são as recomendações de base (ou iniciais) nos quais a AS explora a influência da variabilidade climática, exposição e declarações de preferência na credibilidade desses resultados encontrados. Como mencionado no item 3.1, os índices globais de risco avaliados pelo modelo são numericamente muito próximos entre si e, portanto, em termos de EU, pequenas mudanças no modelo de entrada têm o potencial de alterar o *ranking* de criticidade do risco. Em linhas gerais, o foco principal nesta etapa é estabelecer com a AS uma maneira adequada de lidar com o risco e a incerteza, aumentando assim o rigor científico da análise de riscos e, assim, aumentando a credibilidade das recomendações dos modelos supracitados.

Combinando os três componentes para análise de simulação, este trabalho elaborou por meio do SAD 6 padrões diferentes de simulação. De acordo com o cenário climático, grau de incerteza e sua modelagem probabilística (ver Tabela 6), esses padrões realizaram 50.000 replicações cada. Isso equivale a 300.000 replicações fornecidas pela AS e eles são capazes de detectar combinações de *input* que resultam em uma priorização inesperada do risco de inundação. Em termos práticos, isso permite que o decisor tenha uma compreensão completa da variabilidade de entrada e suas implicações para o gerenciamento de inundações urbanas.

Dessa maneira, as comparações estatísticas entre os padrões de simulação serão conduzidas abaixo contrastando seus componentes. Os valores resumidos do  $\tau$  de *Kendall* são dados na Tabela 9.

Além disso, a SAD permite que o decisor complemente suas inferências na etapa de AS com o auxílio de um gráfico *boxplot* conforme esquematizado na Figura 10, que mostra os resultados de  $\tau$  graficamente e separadamente para cada padrão de simulação.

Uma análise comparativa dos valores médios, medianos e de desvio padrão de  $\tau$ , considerando padrões semelhantes – ou seja, sob o mesmo grau de incerteza e sua modelagem probabilística – mostra que, no caso de GEEs mais elevados, como a RCP 8.5, a priorização do risco de inundação tende a ser um pouco menos robusta do que projeções mais otimistas e a atual.

Como mencionado na Figura 8, a curva de frequência de inundação dá uma pista sobre o motivo pelo qual tal fenômeno acontece. Quando comparado ao cenário de estabilização, a priorização em RCP 8.5 tem registros de precipitação médias mais baixos com mais outliers (extremos climáticos). A função GEV estimada para a pior projeção climática sugere que os valores de desvio padrão das probabilidades *a priori* diminuem ligeiramente. Estes variam

mais significativamente em  $\theta_1$  e  $\theta_3$  e de forma mais aleatória entre as alternativas. Em contrapartida, embora a projeção RCP 4.5 tenha um intervalo de confiança mais amplo, com valores de registros e erros padrão maiores, mudanças consideráveis no *input* desse cenário leva a maior robustez no *ranking* final, quando comparado a um cenário de emissão de GEE mais catastrófico. Isso não significa que as decisões no cenário RCP 8.5 sejam instáveis; no entanto, o decisor deve avaliar os outros componentes a fim de ajustar a sua decisão a níveis aceitáveis.

Tabela 9 – Estatística descritiva dos valores de  $\tau$  de Kendall e respectivos rankings para cada padrão de simulação

Estatística $\tau$	Atual_B_	Atual_A_	4.5_B_	4.5_A_	8.5_B_	8.5_A_	
	U	U	U	U	U	U	
<b>Média</b>	0,5844	0,4490	0,6204	0,3667	0,6089	0,4122	
<b>Mediana</b>	0,6000	0,4333	0,5986	0,4536	0,6167	0,4167	
<b>Moda</b>	0,9167	0,3500	0,6000	0,4500	0,6667	0,4167	
<b>Desvio Padrão</b>	0,2106	0,2038	0,1947	0,3500	0,1823	0,2061	
<b>Valor Mínimo</b>	0,0167	-0,1833	0,0167	-0,2333	0,0167	-0,3667	
<b>Valor Máximo</b>	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	
<b>Número de Rankings Diferentes</b>	155	1635	253	1665	199	1998	
<b>Número de diferentes <math>\tau</math>'s</b>	60	72	59	74	58	83	
<b>Teste de Hipótese <math>\tau</math> de Kendall</b>							
% de 50.000 que rejeitam $H_0^3$	$\alpha = 0.1$	89,14%	73,60%	95,07%	76,55%	93,62%	67,59%
	$\alpha = 0.05$	80,47%	63,78%	89,19%	66,23%	90,82%	59,64%
	$\alpha = 0.01$	68,20%	43,12%	79,37%	46,47%	78,43%	39,10%
<b>p-valor<sup>4</sup></b>	0,00158	0,01510	0,0008	0,01429	0,0010	0,02575	

Fonte: O Autor (2022).

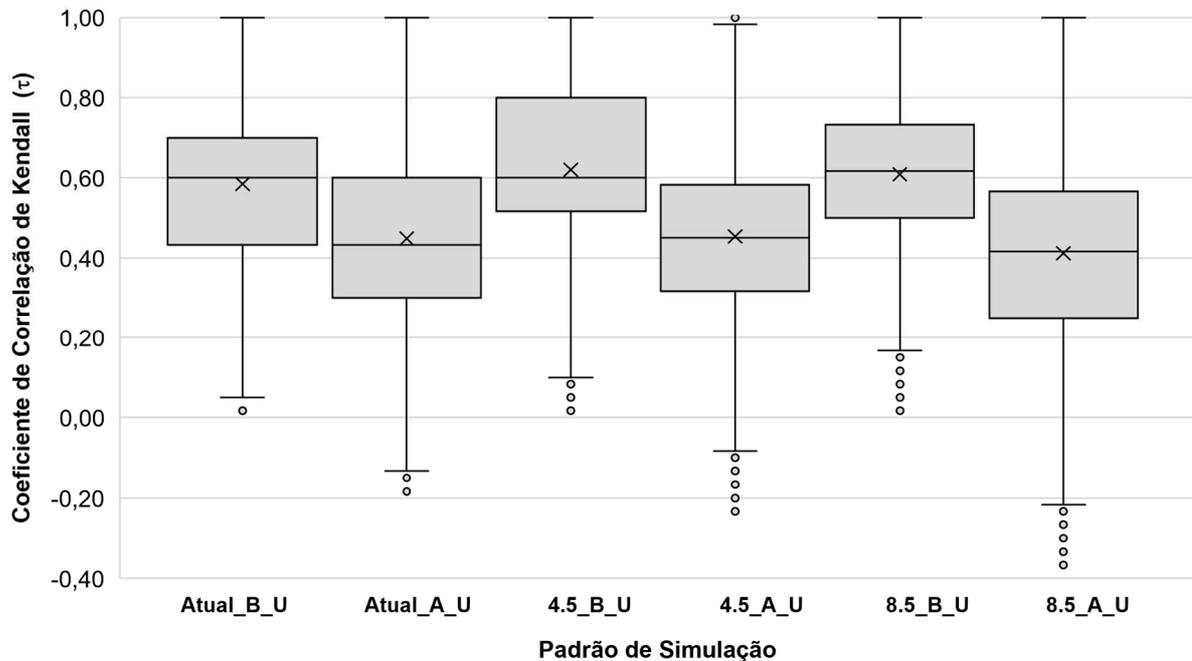
Entretanto, uma análise geral das estatísticas de  $\tau$  na Figura 10 sugere que a inserção de dados climáticos do futuro, quando comparadas ao cenário atual e embora baseadas em previsões de MCGs complexos, não afetam de forma significativa a robustez das recomendações obtidas pelo modelo de risco a longo prazo. Os baixos p-valores obtidos na Tabela 9, realizados com os valores medianos de  $\tau$  para cada padrão de simulação, reforçam

<sup>3</sup> Hipótese nula ( $H_0$ ) de que os rankings inicial e simulado são estatisticamente independentes.

<sup>4</sup> Para valores medianos de  $\tau$ .

que, em um nível de confiança de 95%, a relação monotônica é verificada em todos os cenários, corroborando, então, com esta hipótese.

Figura 10 – Gráfico de boxplot dos valores de  $\tau$  de Kendall para os cenários climáticos vigente, de estabilização (RCP 4.5) e pessimista (RCP 8.5), respectivamente.



Fonte: O Autor (2022).

Os dados apresentados na Tabela 9 também sugerem, principalmente devido à amplitude interquartil, que o grau de incerteza envolvido na modelagem tem uma influência considerável na robustez dos resultados. De baixo a alto grau de incerteza, em todas as projeções climáticas, uma redução notável no  $\tau$  de Kendall pode ser observada. As estatísticas do  $\tau$  de Kendall, em termos de percentual das replicações cuja hipótese nula é rejeitada (isto é, há uma dependência entre os *rankings* inicial e simulado) revelam claramente este fato. O aumento no patamar de incerteza envolvida na definição dos parâmetros-chave do modelo implica em uma redução de até 40% das replicações cuja relação com a ordenação inicial é evidenciada estatisticamente ao nível de confiança de 99%.

De forma análoga, a robustez percebida matematicamente pelos resultados dos padrões de simulação pode ser entendida de outra perspectiva. Em geral, a Tabela 9 mostra que priorizações mais robustas geram *rankings* diferentes na AS. Por exemplo, o padrão Atual\_B\_U gera apenas 155 *rankings* diferentes, enquanto o padrão 8.5\_A\_U compreende quase 2.000 soluções diferentes. Na prática, as inúmeras possibilidades de priorização dos riscos de inundação dificultam a tomada de decisões pelos gestores, podendo sentir-se

encorajado a fazer ajustes no *ranking* original depois de levar em conta a incerteza associada nesta etapa da resolução do problema.

Outra questão importante a ser discutida diz respeito à relação entre  $\tau$  e o respectivo *ranking*. A Tabela 9 revela que embora o número de  $\tau$ 's diferentes seja aproximadamente o mesmo, eles podem produzir muitos rankings diferentes. Consequentemente, não podemos garantir que os valores de IMR sejam os mesmos para um dado  $\tau$ , logo esses rankings precisam ter diretrizes diferentes para a mitigação de riscos. Assim, a análise de simulação tem como objetivo avaliar, em números absolutos, se os *rankings* originais são os mais comuns, e quais fatores mais influenciam na sensibilidade.

A Figura 11 descreve, em termos percentuais, os *rankings* de risco de inundação que ocorreram com mais frequência nos cenários climáticos atual e futuro. Com este tipo de informação, o decisor é capaz de analisar profundamente quais zonas urbanas são mais sensíveis no *ranking*, e o que mais contribui para essas mudanças a fim de compartilhar *insights* para futura adaptação urbana ao clima.

Considerando para efeitos de discussão o cenário climático atual, a zona urbana mais crítica na priorização de risco,  $a_7$ , tende a permanecer com a mesma posição, enquanto a menos crítica é  $a_{11}$  em 100% das replicações.

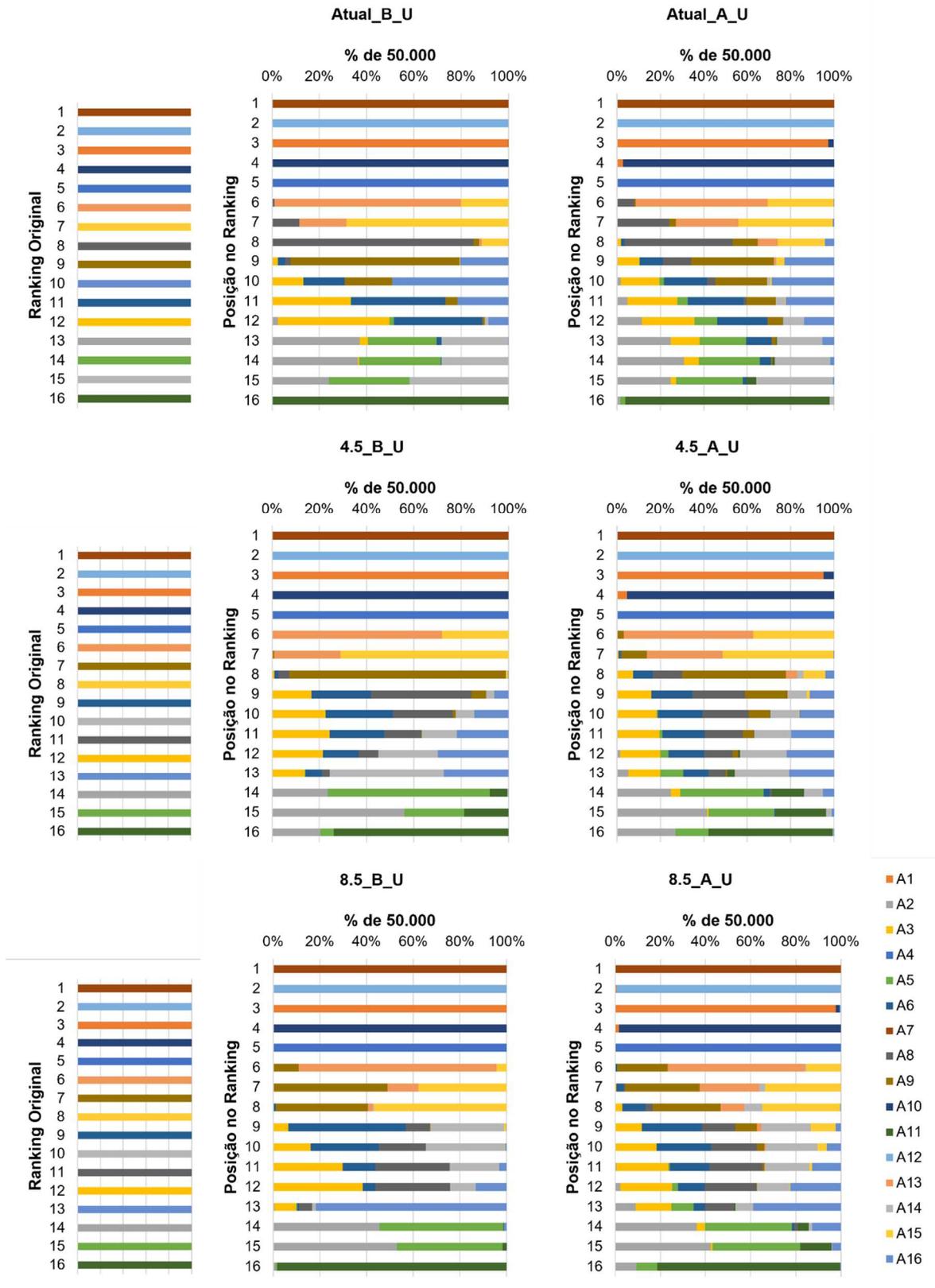
De fato, para os padrões baixo e alto de incerteza, a ordenação inicial  $\{a_7, a_{12}, a_1, a_{10}, a_4, a_{13}, a_{15}, a_8, a_9, a_{16}, a_6, a_3, a_2, a_4, a_{14}, a_{11}\}$  continua sendo a mais recorrente, de modo que a priorização das zonas urbanas é robusta em muitas das replicações.

No entanto, dependendo do grau de incerteza envolvido na simulação, essa proporção diminui e alerta o decisor para identificar outras possíveis posições de risco que possam eventualmente substituir a ordem inicial. Isso ocorre devido à contribuição combinada das variações climática, de exposição e de preferência para o surgimento de novas e potenciais recomendações a serem avaliadas pelo decisor.

Evidências como a que se estabelece acima alertam o decisor para lidar com esses fatores, promovendo assim uma análise cuidadosa de risco após tomar decisões de curto ou longo prazo. Isso também serve como ponto de partida para propor políticas de mitigação de riscos com vistas à redução dos efeitos do clima, da exposição e da atitude ao risco. As informações geradas com a AS contribuem não apenas para os gestores, mas também para os *stakeholders* envolvidos no processo de tomada de decisão. Eles podem compartilhar percepções de risco a partir de evidências estatísticas e simuladas entre si, e essas percepções

também servem de pano de fundo para o desenho criativo de ações sustentáveis para adaptação urbana em meio aos impactos climáticos.

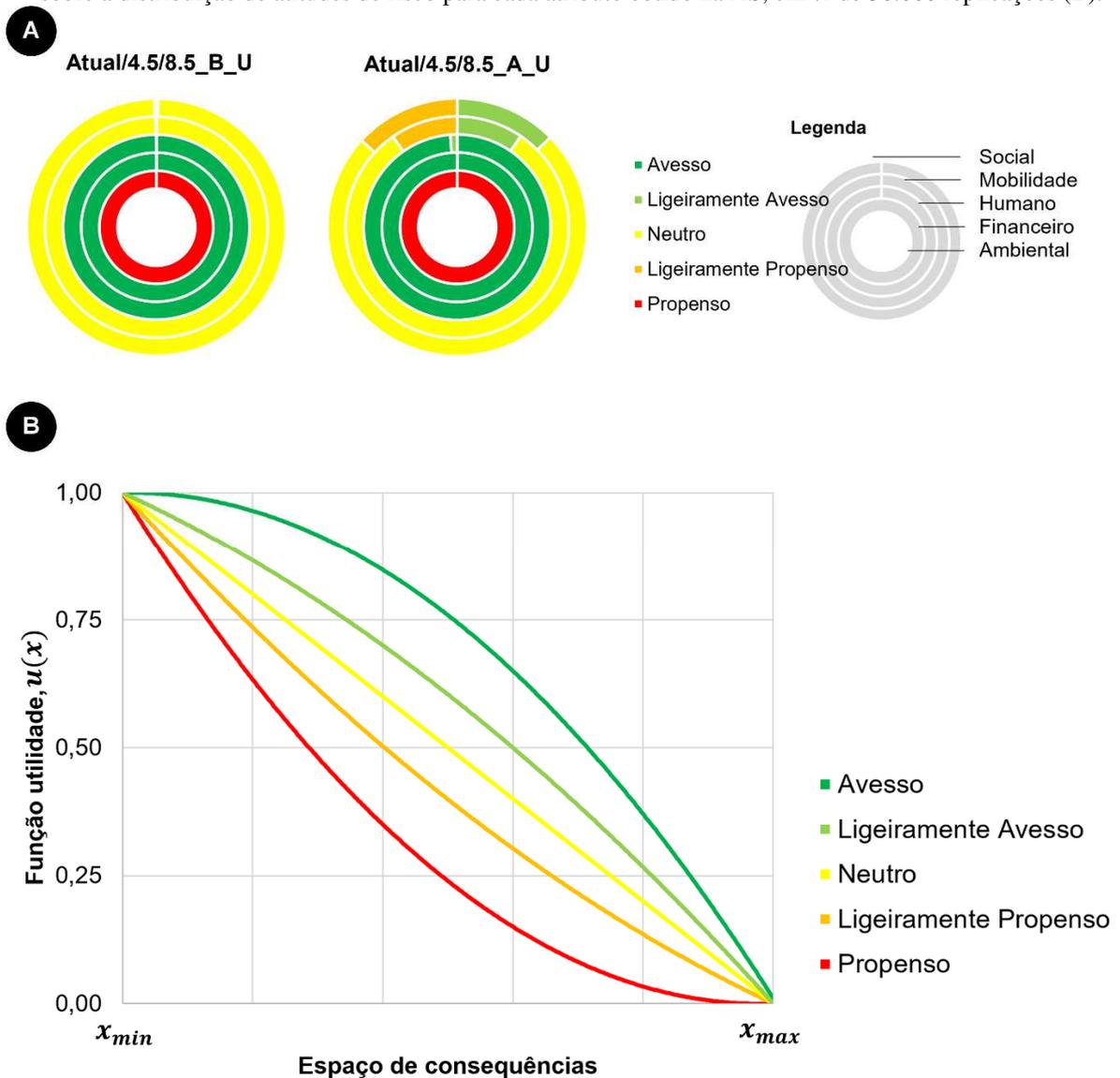
Figura 11 – Dashboard do ranking original e percentual de mudanças na priorização de risco para os cenários climáticos vigente, e futuros.



Fonte: O Autor (2022).

Por fim, a Figura 12-A acrescenta a essa discussão o modo como a incerteza influencia na modelagem de preferências, seja por atitudes de risco para cada atributo ou pelos *trade-offs* entre eles, o que pode impactar a robustez da recomendação. Este estudo de caso supõe variações admissíveis a partir dos pontos notáveis de utilidades, obtidos como respostas do decisor para a obtenção de  $u_{atr}(x|\theta)$ . Ao considerar que pode haver hesitações do decisor ao declarar preferências entre loterias hipotéticas, a remodelação da função utilidade pode mudar suas atitudes de risco.

Figura 12 – Esquema de categorização da atitude do decisor em relação ao risco para a AS (A). Gráfico de rosca sobre a distribuição de atitudes de risco para cada atributo obtido na AS, em % de 50.000 replicações (B).



Fonte: O Autor (2022).

A partir de um gráfico de rosca em vários níveis, pode-se observar que, para todas as projeções climáticas, os padrões de simulação apontam para mudanças nas atitudes de risco

principalmente em dois atributos: mobilidade e social. Portanto, merecem uma revisão cuidadosa do processo de elicitación, além de reforçar o protocolo de Keeney & Raiffa (1976) com testes de consistência para modelar corretamente as preferências do decisor. À medida que o grau de incerteza aumenta, é nítido que a função utilidade do atributo de mobilidade varia de ligeiramente propenso a ligeiramente avesso ao risco, de acordo com a categorização descrita na Figura 12-B. De forma análoga, o atributo social também sofre variações consideráveis no comportamento ao risco. A categorização das atitudes de risco do decisor, a fim de incrementar esta análise dos resultados, foi feita com base em estudos experimentais sobre desvios no processo de obtenção de preferências sobre situações de risco. Aqui, trabalho classifica as atitudes de risco a partir da distância relativa entre o ponto elicitado até a curva neutra, sendo ela o ponto médio entre as consequências extremas. Ao todo, são cinco classes: propenso ao risco, ligeiramente propenso, neutro, ligeiramente avesso ao risco e avesso.

Uma contribuição adicional desta abrangente discussão de resultados está na elaboração de informações cruzadas a fim de poupar tempo e esforço do decisor para a fundamentação de sua decisão final, a ser implementada no contexto de FRM.

### 3.3 Síntese do Capítulo

Este capítulo apresentou, sob uma perspectiva estacionária de análise, dois modelos de decisão baseados em risco multiatributo para priorização de áreas urbanas devido aos efeitos climáticos vigente e futuro. A ampla discussão exposta no item anterior ofereceu uma gama de informações que são extremamente úteis para o contexto da FRM, pois podem ser utilizadas para melhorar decisões estratégicas relativas ao perímetro urbano sob ação do clima. Portanto, a abordagem multiatributo para avaliação de riscos é útil, pois essa abordagem considera natural que os gestores tomem decisões a partir de uma variedade de impactos causados pelas inundações e do modo como isso impacta os espaços urbanos.

Nesse contexto, este item se concentra nos modelos de utilidade discutidos anteriormente para compartilhar, a partir de suas evidências e limitações, *insights* importantes que nos levam a propor de forma complementar um novo método no capítulo 4 (veja Tabela 10).

Tabela 10 – Resumo de evidências e insights compartilhados após análise de risco com os modelos propostos neste capítulo

Lacunas identificadas na Literatura	Evidências	Insights
Sob efeitos climáticos, qual a influência das projeções climáticas do IPCC na priorização de riscos futuros?	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Projeções climáticas com níveis mais altos de GEE tendem a produzir <i>rankings</i> mais robustos do que os demais;</li> <li>• Os piores cenários climáticos concentram probabilidades em eventos extremos (secas e precipitações pesadas);</li> <li>• A inserção de projeções climáticas aos modelos não aumenta significativamente o grau de incerteza associado ao cálculo de risco.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Monitoramento dos níveis locais de GEE para orientar a melhor política de priorização de risco fornecida pelos modelos (VIGUIE; HALLEGATTE, 2012).</li> </ul>
Como as variações na exposição de ativos humanos, financeiros e ambientais, seja devido à urbanização ou ao crescimento populacional, podem afetar a credibilidade da tomada de decisões baseada em risco?	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mudanças na exposição remodelam as funções consequência, destacando as contribuições dos atributos ambiental, financeiro, humano, de mobilidade e social;</li> <li>• A grande influência da exposição na avaliação de risco deve-se a danos futuros que se tornam progressivamente piores considerando padrões de precipitação futuros e extremos, independentemente da projeção RCP.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Incorporar tendências de riscos globais na avaliação de risco de inundação (HAN; HE, 2021);</li> <li>• Estruturar um banco de dados local no qual os órgãos de monitoramento podem usar eventos passados para estimar melhor as funções de consequências, evitando assim o conservadorismo na avaliação de riscos e promovendo decisões confiáveis (AVEN, 2016);</li> <li>• Análise integrada da drenagem urbana, projeto de infraestrutura crítica e intervenções públicas para redução de danos físicos (KIRSHEN et al., 2015; PRIORI; ALENCAR; DE ALMEIDA, 2017).</li> </ul>
A estrutura de preferência do decisor desempenha um papel crítico na robustez dos <i>rankings</i> originais?	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mudanças na exposição remodelam as funções de consequência, destacando assim as contribuições dos atributos de mobilidade e social;</li> <li>• Em diferentes graus de incerteza, o comportamento ao risco nas dimensões acima descritas tem contribuído mais para a mudança dos resultados;</li> <li>• A agregação MAUT com as constantes de escala exerce uma grande influência em considerar todo o padrão de simulação em estudo.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Desenvolver e implementar testes de consistência para avaliar a adequação das funções utilidade e as constantes de escala com o MAUT;</li> <li>• Adaptar o processo de eliciação com informação parcial a fim de reduzir o esforço cognitivo do decisor sem prejudicar a robustez das decisões (DA SILVA et al., 2022);</li> <li>• Desagregar a análise de risco nos atributos de decisão resulta para oferecer ao decisor uma nova perspectiva ao lidar com <i>trade-offs</i> difíceis ou se é difícil avaliar sua robustez.</li> </ul>

Fonte: O Autor (2022).

Para certas lacunas detectadas na literatura (item 2.2), que impulsionaram as proposições dos modelos e suas aplicações numéricas com o uso de um SAD (veja capítulo 5), algumas diretrizes fundamentais foram traçadas para potencializar a adaptação urbana contra futuros eventos naturais. Isso envolve não só a análise hidrológica como também as consequências e atitude de risco, que compreendem as principais contribuições delineadas por este trabalho. Junto com essas evidências, podem surgir oportunidades para estudos futuros.

A metodologia buscou avaliar como a incerteza associada à estimativa dos parâmetros de entrada pode impactar as decisões urbanas. Assim, uma análise aprofundada da influência das declarações climáticas, de exposição e de preferência nos motivou a investigar se o modelo fornece uma tomada de decisão confiável e os principais fatores que impulsionam possíveis mudanças nos resultados.

Com a AS, as principais lacunas apontadas por Aven (2019) e Aven & Renn (2015) são levadas em conta uma análise integrada de riscos e incertezas para modelar a frequência de inundações, impactos e a atitude do decisor em relação aos riscos; e a saída é capaz de capturar a combinação entre evento-gatilho e eventos extremos, o que pode incentivar o decisor a adaptar suas estratégias para diferentes situações.

Sendo assim, esses dados permitem que o decisor compartilhe com as partes interessadas novas perspectivas para decisões de longo prazo de forma que os relatórios da AS com o uso do SAD permitam que a recomendação inicial pelo modelo seja ajustada e bem fundamentada, de acordo com condições específicas que os atores do processo agora percebem.

Ademais, Aven (2019) aponta que um desafio importante a ser abordado para o controle dos riscos climáticos está na associação entre as preferências do decisor e os riscos em termos de valores esperados; dessa forma, os modelos devem aprimorar e detectar potencialmente eventos "surpreendentes" que não são usualmente considerados no cotidiano da administração pública.

Para tanto, Logan et al. (2021) afirmam que isso está relacionado ao persistente equívoco de que análise de risco é adequada para considerar as consequências imediatas de um evento desastroso, fato este que torna a análise limitada para a adaptação frente ao clima e a busca pela sustentabilidade urbana. Segundo os autores, essa noção resultou de uma falta de clareza sobre como o tempo é considerado na análise e caracterização do risco, o que confere um campo de oportunidade no qual o capítulo 4 busca explorar.

## 4 MODELO DE DECISÃO MULTIATRIBUTO NÃO-ESTACIONÁRIO PARA AVALIAÇÃO DE RISCO DE INUNDAÇÃO URBANA COM O NSMAUT

À luz dos avanços metodológicos em utilidade discutidos na seção 2.1.3 e motivado pelas reflexões de Logan et al. (2021), este capítulo apresenta um novo método MCDM/A, intitulado Teoria da Utilidade Multi-Atributo Não-Estacionária (*Non-Stationary Multi-Attribute Utility Theory*: NSMAUT). O item 4.1 detalha a estrutura axiomática que embasa o caráter inovador do novo método, com o uso de um SAD desenvolvido neste trabalho que incorpora em seu escopo a análise temporal de risco com o NSMAUT (detalhado *a posteriori* no capítulo 5). Já o item 4.2 explora por meio de uma aplicação numérica as contribuições dessa perspectiva na adaptação climática das cidades, enquanto o item 4.3 sumariza as lições aprendidas e potencialidades dessa nova abordagem para tomada de decisão baseada em risco.

### 4.1 Estrutura do NSMAUT: um novo método baseado em utilidade esperada dependente do tempo

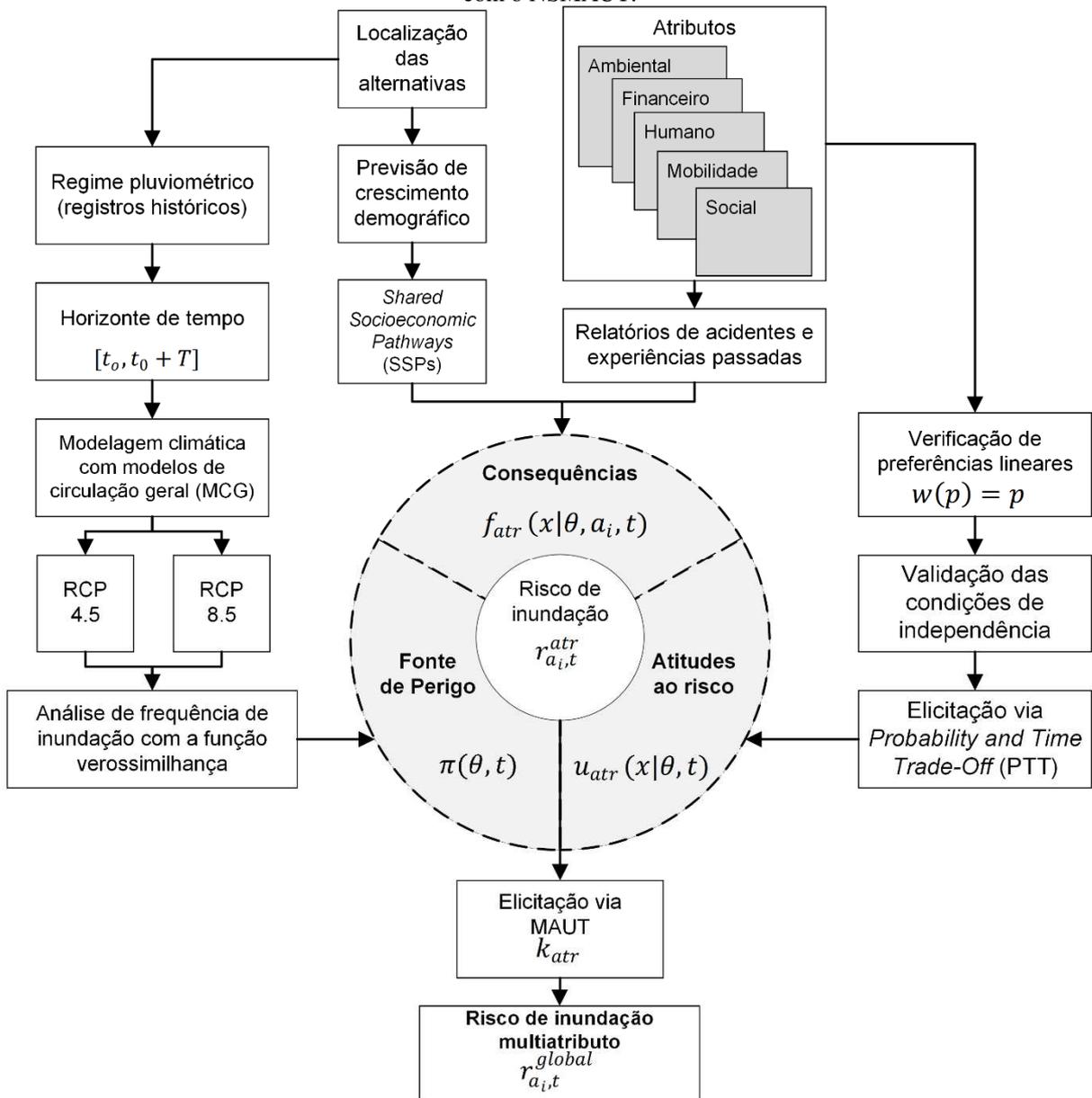
Primeiramente, é importante pontuar que o método NSMAUT, assim como os modelos propostos no capítulo anterior, corresponde a um modelo probabilístico que apoia o decisor na priorização das áreas urbanas de acordo com a criticidade de seu risco de inundação. Entretanto, a base para a análise de risco e, conseqüentemente, tomada de decisão é dinâmica, de modo que a dependência temporal é inserida na composição do risco. Em outras palavras, é objetivo do NSMAUT capturar a tendência de impacto mudanças climáticas não só na ocorrência/ intensidade do fenômeno natural, bem como nas conseqüências geradas por ele e, por conseguinte, nas preferências do decisor.

Nesse sentido, a RSL publicada por da Silva, Alencar & de Almeida (2020), como produto preliminar desta tese (veja item 2.2), analisou a aplicabilidade da abordagem MCDM/A para problemas de risco que lidam com as mudanças climáticas e suas interações. A partir dos resultados obtidos, os autores evidenciaram algumas questões a serem tratadas nesse campo do conhecimento, a saber: (i) poucos modelos de decisão tentam simular condições adversas futuras devido ao clima ou à urbanização e, dentre elas, a maioria utiliza técnicas generalistas geralmente embasadas em relatórios públicos para apoiar decisões locais; e (ii) apesar de muitas ferramentas computacionais terem sido desenvolvidas para prever impactos de inundação, os modelos de risco que compõem o estado da arte são focados na análise estacionária, ou seja, não assumem uma dependência temporal da modelagem de preferências ou dos cenários acidentais e suas conseqüências. Uma vez que o espaço urbano é

naturalmente dinâmico, o NSMAUT surge como uma abordagem inovadora frente a essa lacuna importante no contexto de FRM.

Sendo assim, a evolução metodológica discutida na base teórica (item 2.1.3) foi o ponto de partida para apresentar o novo método, dividido em três fases principais conforme descrito na Figura 13.

Figura 13 – Fluxograma do modelo atributo não estacionário para priorização dos riscos de inundação urbana com o NSMAUT.



Fonte: Adaptado de da Silva, Alencar & de Almeida (2022)

Da Silva et al. (2020) afirmam que, apesar de muitos *stakeholders* exercerem uma influência significativa na tomada de decisão, o contexto de FRM é altamente colaborativo e,

portanto, é importante que analistas e especialistas de diversas áreas ajudem na coleta de conhecimento não apenas sobre a análise da frequência de inundações, mas também pela estimativa das perdas que o evento provoca (AVEN; KRISTENSEN, 2019).

É importante ressaltar que o novo método pode ser aplicado com um fluxograma similar ao descrito na Figura 3, isto é, conforme a adaptação do framework de 12 etapas para resolução de um problema de decisão MCDM/A (DE ALMEIDA et al., 2015). Entretanto, para uma melhor compreensão do leitor acerca dos avanços metodológicos inseridos neste capítulo, a apresentação da estrutura axiomática do novo método será realizada no item a seguir de acordo com as suas diferenças em relação aos outros modelos de risco.

Inicialmente, é necessário frisar que o NSMAUT inclui o procedimento dinâmico de avaliação do risco global de inundação para priorização de acordo com sua criticidade. Aqui, apenas o decisor é responsável por expressar suas preferências em relação ao seu comportamento de tomada de risco sob os cinco atributos envolvidos no problema: ambiental/sanitário, financeiro, humano, de mobilidade e social. Em termos práticos, o decisor representa as preferências e atitudes da administração local para que ele/ela não tenha qualquer conflito de interesses durante o processo, focando então na garantia de recomendações confiáveis.

Ao considerar os riscos naturais, é sabido que o conceito de risco compreende múltiplas definições pois se trata de uma questão multidisciplinar. Conforme já exposto neste trabalho, o risco é aqui encarado como a desejabilidade do decisor sobre a interação entre o perigo e vulnerabilidade do elemento exposto a esse fenômeno ao longo do tempo. Sob essa perspectiva, o modelo não-estacionário foi desenhado de tal forma que diferentes especialistas ajudam o decisor a compreender melhor os três principais pilares de risco: a fontes de perigo, as consequências danosas e as atitudes do decisor em relação ao risco.

#### *4.1.1 Sobre a modelagem da fonte de perigo*

Em primeiro lugar, a delimitação urbana deve ser tratada cuidadosamente pelo decisor. Em seguida, as condições de contorno da dinâmica local de inundações são determinadas usando registros históricos de precipitação e dados de estações hidrometeorológicas que envolvem o perímetro de estudo. Como mencionado no item 2.1.1, o volume de chuvas, que é registrado no índice de precipitação, é transformado em vazão de modo que o evento interage com o sistema urbano e pode desencadear a ocorrência de inundações. Com o NSMAUT, assim como observado nos modelos estacionários, o regime de precipitação que gera a lâmina d'água representa esse fenômeno natural, modelada como o Estado da Natureza,  $\theta$ . Em

contraponto aos modelos anteriores, o NSMAUT adota uma faixa contínua de cenários de perigo  $\theta_j$  que impulsionam os efeitos danosos devido a diferentes graus de severidade de inundação. Isso pode ser justificado pois a discretização de  $\theta$  em categorias, a exemplo da Figura 4, torna-se difícil em virtude de possíveis alterações nos parâmetros-limite  $l_w$  e  $l_c$  ao longo da escala de tempo adotada para a análise de risco.

A relação entre as precipitações e as profundidades do escoamento das chuvas caracteriza, assim, as fontes de risco. Geralmente, essas medidas de interesse podem variar espacial ou temporalmente e são obtidas através da influência do escoamento da água superficial e do fluxo de cursos d'água adjacentes, em valores médios e máximos de pico apoiados por modelos hidrológicos amplamente discutidos na literatura e aplicados na prática por agências de monitoramento de risco (ABDULLAH et al., 2019). Além disso, o índice de precipitação pode ser integrado com ferramentas computacionais gerenciadas por diferentes órgãos de monitoramento. Com isso, pretende-se estimar a relação física entre  $\theta$  e a profundidade da inundação, levando à ocorrência de potenciais danos no sistema urbano, conforme observado em Wu et al. (2020).

O modelo busca modelar o fator não controlado para prever os regimes de inundação frente às alterações climáticas e, portanto, o que deve ser especificado primordialmente é a janela de tempo ( $T$ ) da análise de risco, desde o instante  $t_d$  até  $t_d + T$ , sendo  $t_d$  o tempo de decisão. A definição da escala de tempo é essencial para embasar as discussões oriundas da aplicação do novo método, pois as medidas de risco climático estão sujeitas à incerteza durante o tempo, e isso deve ser tratado adequadamente (AVEN, 2020). Diante desse contexto, o esforço nesta fase é concentrado para quantificar, em termos de distribuição de probabilidade, o padrão de precipitação ao longo de  $T$ . Para isso, os Modelos de Circulação Geral (MCGs) apresentados na Tabela 4 são utilizados como base para prever o regime de chuvas.

O uso da modelagem climática na avaliação do risco de inundação sob uma perspectiva não-estacionária é similar ao modelo estacionário de risco de longo prazo discutido por da Silva, Alencar & de Almeida (2022a). Embora os autores discutam que existem dificuldades naturais na validação das projeções dos MCGs, principalmente porque não há procedimentos formais que possam ser utilizados para validar a exatidão dos resultados, os modelos climáticos são uma das melhores alternativas usadas para detectar tendências, anomalias e outras possíveis implicações dos efeitos climáticos no comportamento do evento natural.

Sendo assim, o processo para escolher o melhor MCG para o local de estudo, a exemplo do que foi discutido no item 3.1.5, segue os critérios de desempenho das previsões após comparar os dados projetados com os dados reais e assumindo que este é um período para o qual é possível obter registros passados ( $t \leq t_d$ ), como visto em Abbasian et al. (2019). Para tanto, inferências sobre o desempenho das modelagens climáticas são compostas por dois tipos de análise: (i) uma análise de desempenho, no qual índices como o EMA e o REMQ reflitam a capacidade de acurácia dos MCGs pela comparação entre os registros projetados em relação aos dados reais; e (ii) uma análise estatística com construção de testes de hipótese de ajuste e tendência para detectar, ainda que preliminarmente, a monotonicidade do regime pluviométrico, bem como a sua correlação com os efeitos climáticos. Em suma, essas diretrizes levam o decisor a filtrar um MCG para simular os padrões de  $\theta$  sob diferentes projeções climáticas (RCPs).

Tendo isso em mente, é possível construir curvas de frequência de inundação para cada cenário RCP, denotada aqui como a função de probabilidade a-priori  $\pi(\theta, t)$  sob uma perspectiva não estacionária. Como mencionado em da Silva et al. (2020), a distribuição GEV é adequada para modelagem de eventos hidrológicos. Nesse sentido, este novo método propõe diferentes equações de parametrização, a depender da dependência temporal dos parâmetros que a função exige (veja equação 13).

$$\pi(\theta, t) = GEV(\theta, \mu(t), \sigma(t), \xi)$$

$$= \begin{cases} e^{-\left(1 + \xi \left(\frac{\theta - \mu(t)}{\sigma(t)}\right)\right)^{-\frac{1}{\xi}}}, & \text{para } \xi \neq 0; 1 + \xi \left(\frac{\theta - \mu(t)}{\sigma(t)}\right) > 0 \\ e^{-e^{-\left(\frac{\theta - \mu(t)}{\sigma(t)}\right)}}, & \text{para } \xi = 0 \end{cases} \quad (13)$$

$$\mu(t) = a_\mu + b_\mu t + c_\mu t^2 \quad (14)$$

$$\sigma(t) = a_\sigma + b_\sigma t + c_\sigma t^2 \quad (15)$$

O GEV usa três parâmetros: localização, escala e forma ( $\mu, \sigma, \xi$ ). Para fins didáticos, a notação  $GEV(\mu(t), \sigma(t), \xi)$  indica, neste capítulo, a ordem da função polinomial em relação aos parâmetros de localização (equação 14) e escala (equação 15) propostos na literatura (OUARDA; CHARRON, 2019).

Nesta etapa, faz-se uso da estimação por máxima verossimilhança (*Maximum Likelihood Estimation*: MLE) a fim de avaliar o grau de ajuste de diversas variações da distribuição GEV, obtidas a partir de diferentes ordens das funções polinomiais de  $\mu(t)$  e  $\sigma(t)$ . O princípio da máxima verossimilhança parte do pressuposto que, a partir de uma

amostra aleatória com densidade  $GEV(\theta, \mu(t), \sigma(t), \xi)$ , os parâmetros  $\mu(t)$ ,  $\sigma(t)$  e  $\xi$  são desconhecidos e, dessa forma, tem-se como anseio estimá-los por meio dos estimadores de máxima verossimilhança (EMVs).

Em outras palavras, um EMV busca maximizar a probabilidade de o parâmetro representar a população (de dados pluviométricos), maximizando a densidade conjunta dos elementos amostrais. A função de verossimilhança para a distribuição GEV está disposta abaixo (veja equação 16). Note que  $\hat{y}_j$  representa o registro de precipitação projetada pelo MCG no instante  $j \in [t_d, t_d + T]$ .

$$L(\mu(t), \sigma(t), \xi) = \prod_{j=t_d}^{t_d+T} GEV(\hat{y}_j) = \frac{1}{\sigma(t)^{t_d+T}} \cdot \prod_{j=t_d}^{t_d+T} \left\{ \left[ 1 + \xi \left( \frac{\hat{y}_j - \mu(t)}{\sigma(t)} \right) \right]^{-\left(\frac{1+\xi}{\xi}\right)} \right\} \exp \left\{ - \sum_{j=t_d}^{t_d+T} \left[ 1 + \xi \left( \frac{\hat{y}_j - \mu(t)}{\sigma(t)} \right) \right]^{-\left(\frac{1}{\xi}\right)} \right\} \quad (16)$$

Sendo assim, o processo de ajuste de  $\pi(\theta, t)$  a GEV consiste em determinar a solução matemática do ponto de máximo para cada parâmetro da função. Por esta razão, geralmente a facilitação desse processo ocorre ao linearizar a equação 17, obtendo-se a função logaritmo de verossimilhança conforme equação abaixo:

$$\begin{aligned} \ell(\hat{y}_j, \mu(t), \sigma(t), \xi) &= \\ &= \sum_{j=t_d}^{t_d+T} \left\{ -\ln[\sigma(t)] - \left(\frac{1+\xi}{\xi}\right) \cdot \right. \\ &\quad \left. \cdot \ln \left[ 1 + \xi \left( \frac{\hat{y}_j - \mu(t)}{\sigma(t)} \right) \right] - \left[ 1 + \xi \left( \frac{\hat{y}_j - \mu(t)}{\sigma(t)} \right) \right]^{-\left(\frac{1}{\xi}\right)} \right\} \end{aligned} \quad (17)$$

Por meio de sistemas de equações relativos aos parâmetros da função GEV por meio da otimização de  $\ell(\hat{y}_j, \mu(t), \sigma(t), \xi)$ , é possível estabelecer os EMVs. Assim, a partir da estimação por máxima verossimilhança, o que pode ser verificado *a posteriori* é se a distribuição não-estacionária de fato melhora a modelagem da frequência de inundações, detectando assim os efeitos climáticos sobre os regimes pluviométricos. Para tanto, alguns critérios podem ser adotados para avaliar o desempenho de uma estimativa  $GEV(\theta, \mu(t), \sigma(t), \xi)$ , como o critério de informação de Akaike (*Akaike Information Criterion*: AIC, equação 18) e critério de informação bayesiano (*Bayesian Information Criterion*: BIC, equação 19). Note que  $\hat{L}$  é a máxima verossimilhança obtida.

$$AIC = 2k - 2 \ln(\hat{L}), \text{ para } k \text{ o número de parâmetros do modelo} \quad (18)$$

$$BIC = k \ln(s) - 2 \ln(\hat{L}) \text{ para } s \text{ a quantidade de dados ou observações} \quad (19)$$

Adicionalmente, o teste da razão de verossimilhança permite comparar a qualidade do ajuste de dois modelos: um modelo irrestrito com todos os parâmetros livres, e seu modelo correspondente restrito pela hipótese nula para menos parâmetros. Assim, pode-se determinar qual oferece um melhor ajuste para seus dados amostrais. No caso, sendo  $\lambda$  o valor da razão da verossimilhança, para grandes amostras o termo  $-2\ln(\lambda)$  segue-se uma distribuição qui-quadrado.

Em conjunto, esses critérios de avaliação de desempenho da previsão climática permitem adotar, com parcimônia e evidência estatística, um modelo não estacionário de  $\pi(\theta, t)$  que melhor represente o regime futuro de precipitação.

#### 4.1.2 *Sobre a dinâmica das consequências*

Nesta fase, o modelo busca estimar as potenciais consequências causadas por diferentes níveis de severidade das inundações ( $\theta$ ). As estratégias da administração local para a redução do risco podem se concentrar em algumas áreas de interesse, nas quais o impacto das mudanças demográficas no aumento do número de pessoas expostas ao risco deve ser levado em conta (Young & Papini, 2020). Portanto, o espaço urbano deve ser dividido em zonas urbanas ( $a_i$ ), estrategicamente delimitadas pelo decisor de acordo com zonas pré-definidas (ou seja, zonas censitárias, bacias hidrológicas etc.). Alternativamente, os gestores podem utilizar divisão geopolítica, características homogêneas ou outras questões técnicas para concluir essa etapa se as fontes de dados dessa nova divisão não introduzirem dificuldades na aplicação do modelo NSMAUT.

Para cada zona urbana, esta fase incentiva o apoio técnico adicional a ser buscado de urbanistas, órgãos de controle e monitoramento e outros atores, a fim de estabelecer uma relação de causalidade entre as chuvas e as profundidades das inundações, o clima por modelos hidrológicos ou outras ferramentas estatísticas que traduzam esse fenômeno (ABDULLAH et al., 2019; WU et al., 2020). Além disso, essa etapa estabelece suas implicações sobre suas consequências, representadas por questões ambientais e sanitárias, financeiras, humanas, de mobilidade e sociais.

Assim, além de definir os parâmetros-chave para medir os danos causados pelas inundações de modo similar ao estabelecido na Tabela 7, o modelo formula funções de

consequência em termos de distribuições de probabilidades, a fim de analisar os diferentes níveis de perdas que podem ocorrer.

A dependência temporal é inserida em  $f_{atr}(x|\theta, a_i, t)$ , admitindo que os parâmetros-chave (perdas médias) da Tabela 7 variam proporcionalmente com a taxa de alterações demográficas da região em estudo. Com o auxílio de simulações computacionais, esse modelo trata de dados de acesso aberto no que diz respeito aos cenários demográficos, ditos *Shared Socioeconomic Pathways* (SSPs). Amplamente utilizados para políticas de adaptação urbana, os cenários da SSP compreendem narrativas que descrevem desenvolvimentos socioeconômicos alternativos e facilitam uma análise integrada dos impactos climáticos futuros, adaptação e mitigação (HEWITT et al., 2021). Eles estão divididos em cinco trajetórias socioeconômicas detalhadas a seguir:

- SSP1 ("*Sustainability*") – A sociedade gradualmente se torna sustentável no que diz respeito às normas ambientais, aos objetivos de desenvolvimento e ao consumo consciente. A transição demográfica é acelerada pelos investimentos em educação e saúde. O foco é o bem-estar e a qualidade de vida;
- SSP2 ("*Middle of the Road*") – Questões sociais, econômicas e tecnológicas seguem padrões históricos, combinados com o crescimento populacional moderado. Os desafios sociais e ambientais persistem;
- SSP3 ("*Regional Rivalry*") – Ambiente competitivo e concentrado em questões locais/regionais. Foco na segurança nacional e no desenvolvimento de bases que resultem em questões ambientais. Há uma diminuição de recursos para educação e tecnologia, com intenso crescimento populacional em países subdesenvolvidos;
- SSP4 ("*Inequality*") – Forte desigualdade regional, gerando conflitos e agitação social. Disparidades crescentes nas oportunidades econômicas e no poder político das nações;
- SSP5 ("*Taking the Highway*") – Rápido crescimento econômico com exploração de combustíveis fósseis, embora haja algum controle ambiental. Foco em um mercado competitivo e inovação com o engajamento da sociedade para alcançar o desenvolvimento sustentável.

Conforme afirmado por Riahi et al. (2017), os cenários demográficos referenciados podem contribuir com o modelo na formação das funções de consequência, o que pressupõe uma grande correlação entre a densidade demográfica em uma zona urbana com suas estatísticas médias de perdas, descritas adequadamente na Tabela 7. Aqui, vale ressaltar que

os padrões socioeconômicos de crescimento populacional desenvolvidos pelas SSPs devem ser reduzidos em escala local para lidar com a dinâmica particular do estudo. Para tanto, o modelo faz uso da proposta de Wear & Prestemon (2019) que seleciona modelos matemáticos para desenvolver uma melhor estratégia para definir valores de efeitos fixos de tempo para períodos futuros que correspondam às projeções da SSP em nível nacional. As estratégias alternativas de estimativa incluem a estimativa máxima de verossimilhança (MLE) sobre um conjunto de componentes, ou seja, abordar a localização, o tempo e os efeitos espaciais em escala local. Apesar de não ser o foco do trabalho, essas diretrizes são flexíveis para incorporar outras abordagens de regionalização dos dados, como observado em Frame et al. (2018) e Yang & Cui (2019).

Assim, o NSMAUT é capaz de captar como as consequências se comportam ao longo do resto do século, o que certamente afeta a análise de risco. Alternativamente, diferentes abordagens para o FRM podem melhorar essa previsão, e estas incluem modelos probabilísticos (HODGKINS et al., 2019), simulações computacionais (EGGIMANN et al., 2021) e modelagem *CA-Markov* (ZHOU et al., 2020).

#### 4.1.3 Sobre a elicitación de preferências dependente do tempo

Este item insere uma novidade no MAUT clássico, isto é, um importante avanço metodológico: a dependência de tempo sobre preferências. Dessa maneira, as declarações de preferência do decisor exercem um papel crucial no processo. Em termos de utilidades, este modelo visa obter funções utilidade  $u_{atr}(x|\theta, t)$  para cada atributo sob EU, utilizando assim o modelo *Probability and Time Trade-off* (PTT) (BAUCCELLS; HEUKAMP, 2012). Este procedimento foi escolhido para lidar com a crescente impaciência que os decisores poderiam ter ao consumir perspectivas atrasadas; em outras palavras, estudos experimentais têm demonstrado que, sempre que decisões de longo prazo estão envolvidas, o fator tempo influencia o decisor a estabelecer suas preferências ao longo do tempo de maneira distinta.

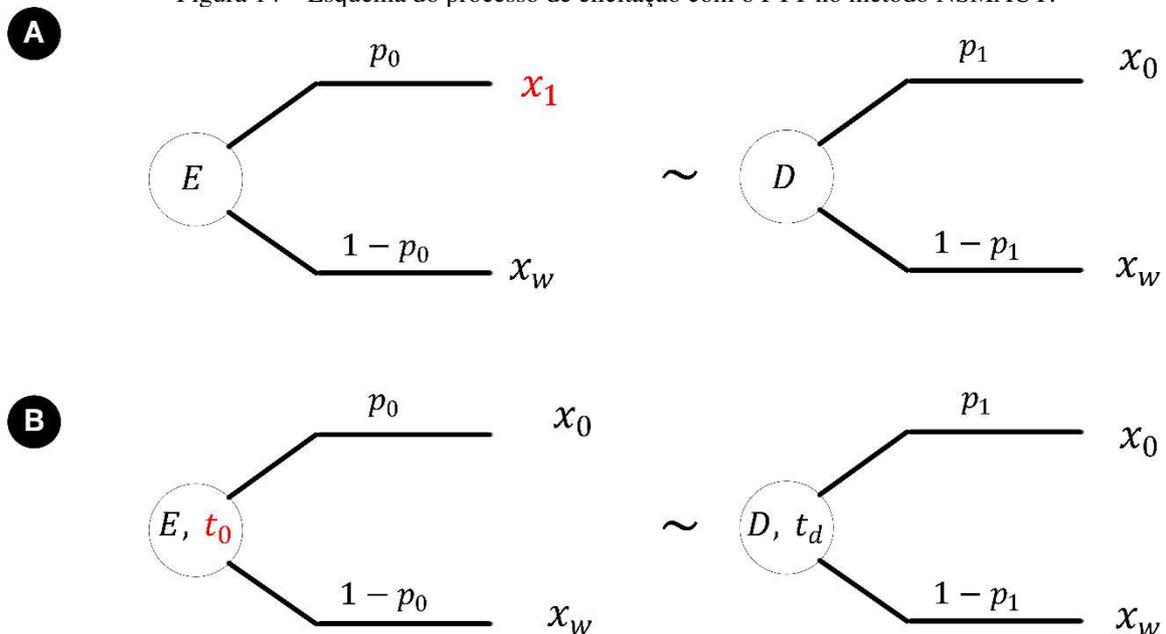
Como amplamente discutido na seção 2.1.3, o PTT é parcimonioso, e a partir da análise de prospectos simples, o procedimento tem a utilidade esperada com desconto temporal como um caso especial. Diante desse cenário, a aplicabilidade do NSMAUT depende da percepção linear do decisor quanto ao seu julgamento de probabilidade para todos os atributos envolvidos. Por isso, é importante verificar a linearidade antes de elicitar as preferências do decisor. Alguns procedimentos discutidos por Wakker (2010) se concentram em modelar a forma das percepções do decisor em relação à ponderação das probabilidades. Apesar de não ser o ponto central deste trabalho, os estudos parciais deste projeto (MEDEIROS et al., 2021)

levaram a evidências de que, em um grau considerável, as probabilidades lineares são aplicáveis no que diz respeito às perspectivas de modelagem nos atributos listados na Tabela 7. Por essa razão, o NSMAUT assume que o comportamento do decisor segue  $w(p) = p$ , um ponto de partida para garantir a forma da função utilidade, conforme descrito na Definição. 4

**Definição 4.** Seja  $x$  uma consequência em relação a um atributo  $atr$  no conjunto de *payoffs*  $\mathbf{X}$ . Sejam  $x_w$  e  $x^*$  a pior e melhor consequência possível em  $\mathbf{X}$ , respectivamente. Considerando que as preferências são estabelecidas no momento da decisão,  $t = t_d$ , então a função utilidade não estacionária sob a EU é representada por  $u_{atr}(x|\theta, t): \mathbf{X} \times [t_d, t_d + T] \mapsto [0,1] \subset \mathbb{R}$  de modo que  $u_{atr}(x_w|\theta, t) = 0$ ,  $u_{atr}(x^*|\theta, t) = 1$ ,  $u_{atr}(x|\theta, t) = e^{-rxt}u(x), \forall x \in \mathbf{X}$  e  $t \in [t_d, t_d + T]$ .

Assim, a base axiomática da função utilidade representada na Definição 4 possui as seguintes propriedades: ordenação, continuidade, monotonicidade, *subendurance* e separabilidade multiplicativa. Juntos, eles motivaram Baucells & Heukamp (2012) a introduzir um aspecto novo na Análise da Decisão, adotando um procedimento de elicitacão livre de parâmetros. A intenção é reduzir o esforço cognitivo que o decisor é obrigado a fazer para declarar suas preferências em etapas encadeadas, como esquematizado na Figura 14.

Figura 14 – Esquema do processo de elicitacão com o PTT no método NSMAUT.



Fonte: O Autor (2022).

Antes de iniciar este processo, o decisor deve definir uma série de  $m \geq 1$  etapas de maneira que, à medida em que  $m$  cresce, a elicitacão se torna mais precisa. Além disso,

escolhe-se uma consequência  $x_o > x_w$  e uma probabilidade  $0 < p_1 < 1$ . Assumindo  $p_o = 1$ , o decisor deve determinar um valor de  $x_1$  no qual ele/ela esteja indiferente entre os prospectos da esquerda (E) e direita (D) (veja Figura 14-A). A pergunta é repetida, substituindo-se  $x_o, x_1$  por  $x_1, x_2$ , respectivamente, com o objetivo de estimar  $x_2$ , e assim por diante até que o  $m$ -ésimo passo seja concluído. Em EU, a indiferença estabelece os valores de utilidade  $(x_o, x_1, \dots, x_m)$  para o conjunto. Deve-se notar que esses prospectos seriam obtidos imediatamente no momento  $t = t_d$ .

Depois disso, para cada resultado obtido anteriormente, o modelo dispõe ao decisor novos prospectos, mas agora com atrasos no recebimento deles (veja Figura 14-B). Nessa perspectiva, o principal objetivo do NSMAUT é encontrar  $t_o$  no qual decisor seja indiferente entre E e D. Este passo é repetido  $m$  vezes, substituindo  $t_o, x_o$  por  $t_1, x_1$  e assim por diante. Em seguida, os resultados levam o NSMAUT a estimar as taxas de desconto,  $r_x$ .

Além disso, nesta fase, devem ser detectadas condições de independência em utilidade e aditiva entre os atributos, a fim de justificar a forma analítica de riscos multiatributo (KEENEY; RAIFFA, 1976). Finalmente, o comportamento de risco sob o domínio de perda é medido a fim de inserir informações preferenciais no cálculo de risco. Como resultado, pode-se estimar para cada atributo a métrica de risco marginal em um determinado tempo  $t$ , como visto na equação 20. Ela pode ser obtida a partir de diferentes combinações de cenários climáticos (RCP) e demográficos (SSP) simultaneamente.

$$r_{a_i,t}^{atr} = - \int_{\theta} \pi(\theta, t) f_{atr}(x|\theta, a_i, t) u_{atr}(x|\theta, t) d\theta \quad (20)$$

Uma análise atenta sobre a equação anterior revela que isso representa os valores de risco unidimensionais para cada atributo. A partir de agora, o NSMAUT utiliza as constantes de escala para agregar essas métricas em uma medida de risco global, com o objetivo de ranquear as zonas urbanas de acordo com sua criticidade para, em seguida, mapear os riscos de inundação urbana.

Em seguida, a tarefa principal é reunir *trade-offs* dos atributos envolvidos na análise de risco (que muitas vezes entram em conflito entre si) em uma métrica de risco multiatributo. Conforme estabelecido no item 2.1.3, o NSMAUT considera que a decisão ocorre um ponto de cada vez ( $t = t_d$ ), de modo que o decisor faça uso da abordagem MAUT para quantificar a relação compensatória entre os atributos, seguindo o protocolo de Keeney & Raiffa (1976). Ressalta-se que, para agregação de riscos, não há influência de tempo na preferência relativa

do decisor, pois apenas sua estrutura de preferência é considerada e que será estabelecida no momento atual ( $t_d$ ) na qual a decisão será tomada.

Assim, o protocolo MAUT leva o decisor a declarar suas preferências entre as loterias hipotéticas  $[(x^{amb}, x^{fin}, x^{hum}, x^{mob}, x^{soc}), p, t_d]$  cujos resultados incluem todos os atributos mencionados na Tabela 7. Diferentes combinações de consequências são feitas estrategicamente para que o decisor possa estabelecer preferências relativas entre pares de atributos. Como resultado, essa citação levou o modelo a obter as constantes de escala  $k_{atr}$ , que são parâmetros essenciais que permitem ao modelo compilar um índice de risco a partir de vários atributos. Ao obedecer às condições de independência subjacentes, o método NSMAUT introduz no cálculo do risco uma forma aditiva e linear. Assim, por um determinado tempo instantâneo  $t$ , o valor de risco multiatributo para uma zona urbana é esquematizado na equação 21.

$$r_{a_i,t}^{global} = \sum_{atr} k_{atr} r_{a_i,t}^{atr} = - \sum_{atr} k_{atr} \left\{ \int_{\theta} \pi(\theta, t) f_{atr}(x|\theta, a_i, t) u_{atr}(x|\theta, t) d\theta \right\} \quad (21)$$

Aqui, a análise de risco baseada no tempo considera todos os efeitos possíveis de uma ampla e contínua gama de níveis de gravidade de inundação. Conforme também justificado nos modelos estacionários, o sinal negativo na equação de risco inverte a escala de risco (BERGER, 1985) a fim de priorizar as zonas urbanas mais críticas do ranking.

A seguir, as Definições 5 e 6 a seguir delineiam a estrutura de preferência ( $\succ^t, \sim^t$ ) do decisor sobre o conjunto de zonas urbanas e, assim, parametrizam a priorização do risco de forma dinâmica.

**Definição 5.** Sejam  $a_i, a_j$  duas zonas urbanas diferentes em  $\mathbf{A}$ . Uma relação de preferência ( $\succ^t$ ) sobre o conjunto de alternativas é representada pela função de risco  $r_{a_i,t}^{global}$ ,  $r_{a_j,t}^{global}: \mathbf{A} \times [t_d, t_d + T] \mapsto [-1,0] \subset \mathbb{R}$  tal que  $a_i \succ^t a_j \Leftrightarrow r_{a_i,t}^{global} > r_{a_j,t}^{global} \forall a_i, a_j \in \mathbf{A}$ . Essa relação é transitiva, assimétrica e não reflexiva.

**Definição 6.** Sejam  $a_i, a_j$  duas zonas urbanas diferentes em  $\mathbf{A}$ . Uma relação de indiferença ( $\sim^t$ ) sobre o conjunto de alternativas é representada pela função de risco  $r_{a_i,t}^{global}$ ,  $r_{a_j,t}^{global}: \mathbf{A} \times [t_d, t_d + T] \mapsto [-1,0] \subset \mathbb{R}$  tal que  $a_i \sim^t a_j \Leftrightarrow r_{a_i,t}^{global} = r_{a_j,t}^{global} \forall a_i, a_j \in \mathbf{A}$ . Essa relação é transitiva, simétrica e reflexiva.

Enquanto a equação 21 captura métricas de risco em um instante no tempo, a equação 22 calcula riscos médios em períodos padronizados, para  $t_d \leq t_a < t_b \leq t_d + T$ , com o objetivo de facilitar o monitoramento dos resultados de risco ao longo da janela de tempo.

Esse horizonte de tempo é estrategicamente projetado pelos gestores públicos e outros profissionais, de acordo com suas necessidades.

As definições 5 e 6 também podem ser replicadas para resultados médios. Como resultado da equação 22, o *ranking* de riscos de inundação e o mapeamento de zonas urbanas levam os decisores a implementar medidas estratégicas de adaptação de acordo com os efeitos futuros. Embora Aven (2019) afirme que os riscos climáticos perdem informações ao adotar valores esperados, a modelagem proposta busca superar essa questão inserindo não apenas informações preferenciais dos decisores, mas também a análise temporal dos efeitos climáticos e urbanos sobre os impactos das inundações.

$$\bar{r}_{a_i, \Delta t}^{global} = -\frac{1}{t_b - t_a} \sum_{atr} k_{atr} \left\{ \int_{t_a}^{t_b} \int_{\theta} \pi(\theta, t) f_{atr}(x|\theta, a_i, t) u_{atr}(x|\theta, t) d\theta dt \right\} \quad (22)$$

Assim, a perspectiva não-estacionária tem o potencial de detectar “eventos surpreendentes” que não poderiam ser verificados nos modelos estacionários a partir de seus resultados. Adicionalmente, a depender do sinal e do valor de suas derivadas parciais ao longo do tempo  $\frac{\partial r_{a_i, t}^{global}}{\partial t}$ , é possível destacar entre as diferentes zonas urbanas que compõem o conjunto de alternativas qual(is) está(ão) aumentando/diminuindo significativamente em magnitude de risco. Isso pode ser um alerta preventivo importante para se antecipar ao futuro agravamento dos impactos de inundação através das mudanças climáticas e crescimento demográfico.

Além disso, os efeitos sazonais podem ser detectados a partir de uma análise aprofundada de  $\pi(\theta, t)$  e  $r_{a_i, t}^{global}$ . Na prática, isso pode ser útil para orientar melhor os atores do problema no planejamento em relação ao momento em que é mais favorável implementar medidas de adaptação sem causar grandes prejuízos. Sob outra perspectiva, a definição matemática do IMR também pode ser estendida ao NSMAUT.

Os resultados do método podem incluir o uso de análises estatísticas, gráficas e de desempenho de risco para lidar com os riscos de inundação urbana, considerando a incerteza da variabilidade climática, o crescimento urbano e as atitudes de risco do decisor. A seguir, com o *SAD Flood MATTERS* e suas funcionalidades, uma aplicação do modelo de risco baseado no NSMAUT em uma cidade brasileira destaca as contribuições do novo método para a área do conhecimento.

## 4.2 Aplicação numérica em uma região político-administrativa da cidade do Recife (Pernambuco)

Um estudo de caso realístico foi analisado em na RPA-5 (Recife, Pernambuco) com o objetivo de buscar validar o novo método nesta seção. Esta aplicação numérica foi baseada no contexto abordado no item 3.2, que trata de uma Região Político-Administrativa composta por aproximadamente 16 bairros que sofrem constantemente com os efeitos danosos das inundações em meio à bacia do rio Tejipió.

### 4.2.1 Descrição do contexto de aplicação

Nesse sentido, cabe avaliar que o item 3.2 sumariza de forma preliminar alguns importantes passos para a escolha do MCG. Através da comparação de desempenho de diferentes modelos climáticos detalhados na Tabela 4, o modelo BESM foi escolhido para simular as futuras fontes de risco. Ele utiliza um método de *downscaling* para regionalizar a projeção climática por meio da modelagem de características locais dos biomas brasileiros. No cenário RCP 4.5, executamos o modelo para obter registros mensais de precipitação máxima até 2100. Em seguida, o procedimento de estimação por máxima verossimilhança (MLE) foi aplicado para estimar e comparar as modelagens estacionária e não estacionária, assumindo com  $\alpha = 0,05$  que a função GEV caracteriza o comportamento de inundação após as estatísticas de K-S.

A Tabela 11 resume seis modelos de  $\pi(\theta, t)$ , que diferem umas das outras de acordo com o grau de dependência da distribuição GEV no tempo. Como observado, os modelos não estacionários proporcionam, pelos critérios de AIC, BIC e do teste da razão de verossimilhança, uma melhoria na modelagem do Estado da Natureza, quando comparado com o modelo dito estacionário,  $GEV(0,0,0)$ .

A um nível de confiança de 95%, o teste LRT provou estatisticamente que quatro dos cinco modelos não estacionários explicam melhor os padrões de precipitação, comparados ao modelo estacionário  $GEV(0,0,0)$ . A partir de uma análise de desempenho dos indicadores AIC e BIC, a função não estacionária  $GEV(1,1,0)$  faz uso do princípio da parcimônia para mostrar que é a melhor distribuição de  $\pi(\theta, t)$  a ser adotada para explicar a variabilidade e tendência dos dados pluviométricos por meio de funções lineares em  $\mu(t)$  e  $\sigma(t)$ .

As Figuras 15 e 16 fornecem, respectivamente uma visão 3D e comparativa da frequência de inundações ( $\pi(\theta, t)$ ), destacando que, sob o cenário climático RCP 4.5, os

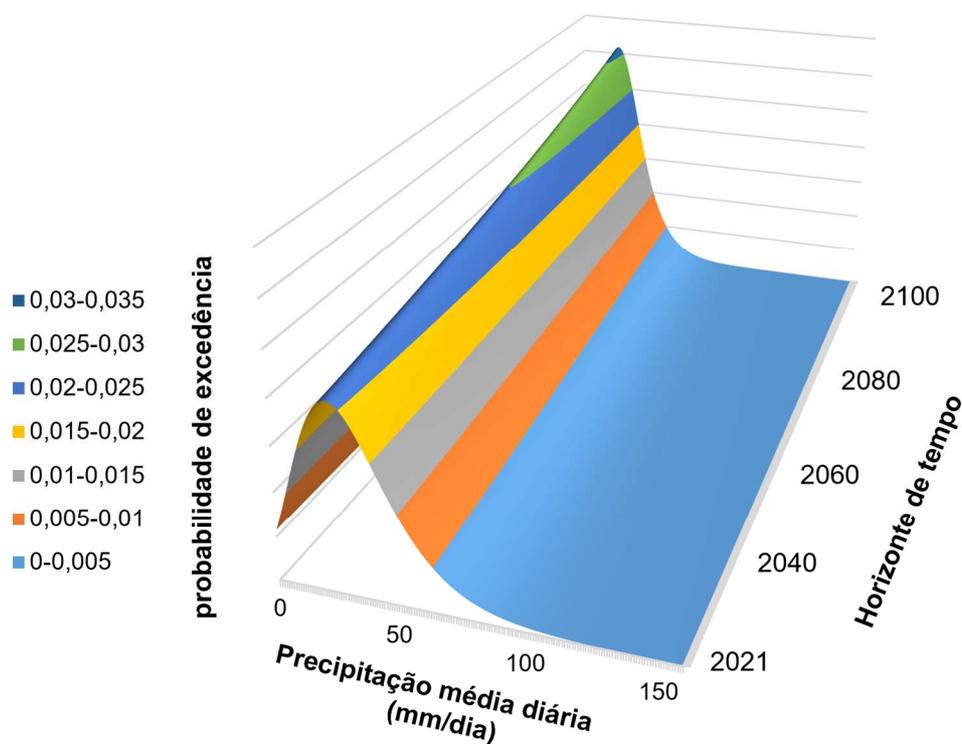
índices médios de precipitação e sua variabilidade devem diminuir. Analogamente, a mesma análise pode ser replicada para o cenário RCP 8.5.

Tabela 11 – Resumo e estatísticas das funções GEV estacionárias e não estacionárias com MLE

<b>GEV</b> <b>(<math>\mu, \sigma, \xi</math>)<sup>5</sup></b>	<b><math>\mu(t)</math></b>			<b><math>\sigma(t)</math></b>			<b><math>\xi</math></b>	<b>LRT<sup>6</sup> (<math>\alpha =</math> 0.05)</b>	<b>AIC</b>	<b>BIC</b>
	<b><math>a_\mu</math></b>	<b><math>b_\mu</math></b>	<b><math>c_\mu</math></b>	<b><math>a_\sigma</math></b>	<b><math>b_\sigma</math></b>	<b><math>c_\sigma</math></b>				
<i>GEV</i> (0,0,0)	2.16 E+01	-	-	1.53 E+01	-	-	2.84 E-01	-	-14915.65	-14899.98
<i>GEV</i> (1,0,0)	2.30 E+01	-1.56 E-03	-	1.54 E+01	-	-	2.74 E-01	rejeitar Ho	-14911.84	-14890.95
<i>GEV</i> (1,1,0)	2.66 E+01	-3.94 E-03	-	2.22 E+01	-6.19 E-03	-	4.65 E-02	rejeitar Ho	-14925.73	-14899.62
<i>GEV</i> (2,0,0)	2.21 E+01	1.62 E-03	-1.93 E-06	1.53 E+01	-	-	2.80 E-01	rejeitar Ho	-14912.02	-14885.91
<i>GEV</i> (2,1,0)	2.54 E+01	-1.29 E-03	-2.48 E-06	2.12 E+01	-6.37 E-03	-	2.37 E-01	rejeitar Ho	-14853.51	-14822.17
<i>GEV</i> (2,2,0)	2.22 E+01	-4.88 E-06	-3.54 E-08	2.40 E+01	-1.62 E-02	6.46 E-06	1.00 E-01	não-rejeitar Ho	-14924.30	-14887.74

Fonte: O Autor (2022).

Figura 15 – Gráfico 3D de *GEV*(1,1,0) entre 2021 e 2100 para a RPA-5 (Recife, Pernambuco).



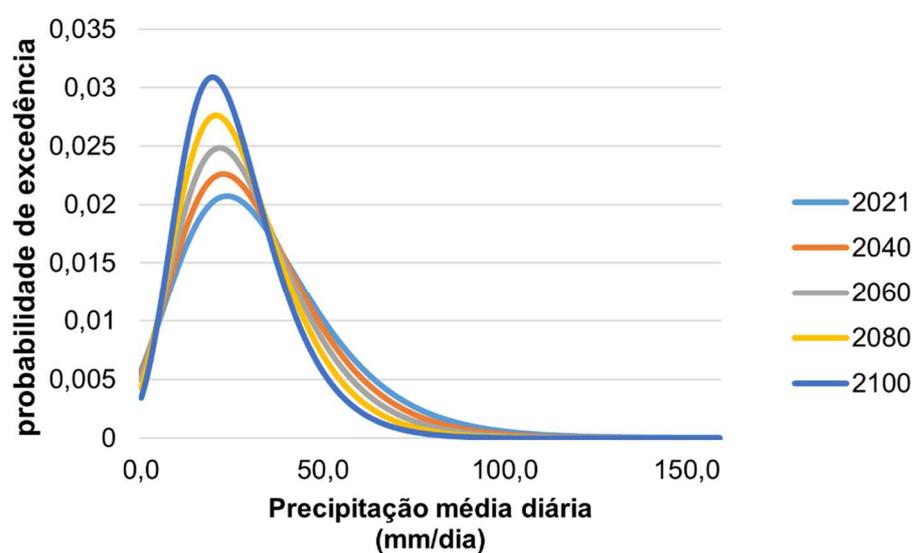
Fonte: O Autor (2022).

<sup>5</sup>  $t$  em meses;

<sup>6</sup> Teste de razão de probabilidade: a Hipótese Nula assume que *GEV*(0,0,0) explica a variabilidade nos dados pluviométricos em substancialmente mais detalhes do que *GEV*( $\mu, \sigma, \xi$ ).

Em seguida, a segunda fase indica que o decisor precisa obter e analisar os esforços de analistas e especialistas para estimar, em termos de funções consequência, os danos causados pelas inundações a todos os atributos: ambiental, financeiro, humano, de mobilidade e social. Deve-se esclarecer que o atributo ambiental estima nesta aplicação a contaminação potencial dos corpos hídricos por leptospirose, uma vez que a cidade do Recife possui registros históricos de contaminação desenfreada desse patógeno logo após a deflagração de eventos hidrológicos em razão do sistema de saneamento precário em diversos pontos do município.

Figura 16 – Análise comparativa de GEV(1,1,0) em diferentes instantes de tempo para a RPA-5 (Recife, Pernambuco).



Fonte: O Autor (2022).

Similarmente aos modelos estacionários, relatórios públicos locais apoiados por *benchmarks* de funções de dano de acordo com a lâmina d'água foram essenciais para orientar o modelo na atribuição de distribuições de probabilidade  $f_{atr}(x|\theta, a_i, t)$  a cada um. Nesta aplicação, as funções consequência foram atribuídas na forma de FDPs esquematizados na Tabela 7.

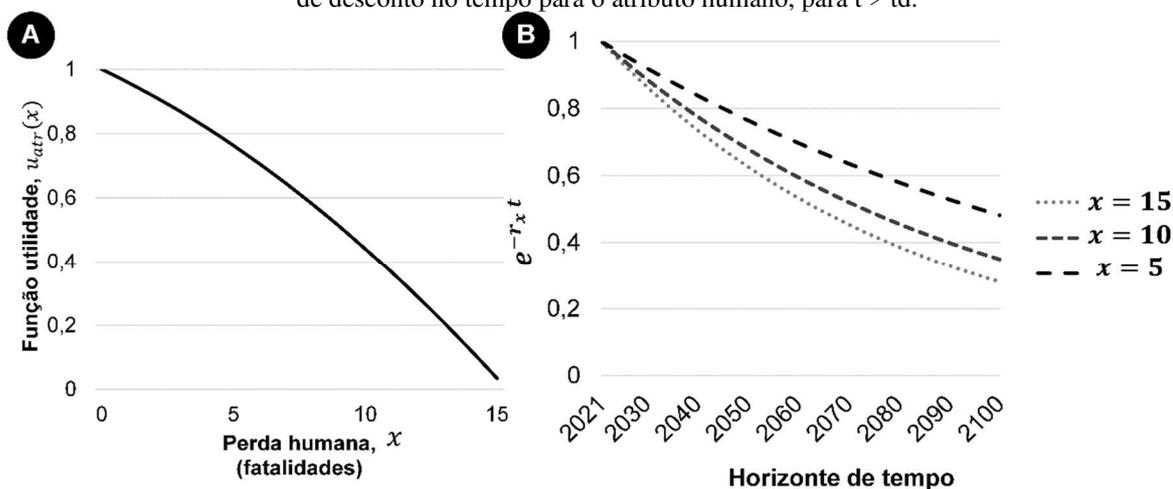
Como há escassez de dados sobre projeções populacionais confiáveis e locais no perímetro de estudo, o NSMAUT introduz a perspectiva não estacionária das consequências das inundações, ajustando os parâmetros-chave na Tabela 7 proporcionalmente com a taxa média de variação populacional no Brasil no cenário populacional SSP3, regionalizadas de acordo com a técnica de Wear & Prestemon (2019) para o contexto regional.

Apesar dessas informações não serem precisas para determinar densidades demográficas em pequenas áreas, simulações computacionais urbanas com SSPs podem ser

usadas para incrementar a análise de risco de forma satisfatória quando o decisor e os analistas têm dados suficientes. Aqui, o SSP3 indica crescimento populacional contínuo, o que há um aumento na velocidade de crescimento no último quarto de século.

Por fim, as preferências temporais do decisor deve atribuir utilidades a todos os atributos usando o procedimento de elicitación por PTT. Sob o domínio da perda, o decisor estabelece a partir das funções consequências os piores resultados possíveis ( $x_w$ ), sabendo que as melhores consequências ( $x^*$ ) esperadas pelos decisores implicam na ausência de danos percebidos pelo evento hidrológico. Figura 17 descreve os resultados da elicitación via *Probability and Time Trade-off* para o atributo humano neste problema.

Figura 17 – (A) A função utilidade para o atributo humano, considerando  $t = t_d$  (tempo de decisão); (B) A taxa de desconto no tempo para o atributo humano, para  $t > t_d$ .



Fonte: O Autor (2022).

Como visto na Figura 17-A, o decisor é considerado avesso ao risco em relação ao número de mortes por inundações, e isto molda a função na forma proposta da equação 7. Em suma, as funções utilidade unidimensional usando o PTT foram semelhantes às funções obtidas na aplicação do capítulo 3, uma vez que a elicitación, naquele caso, também ocorreu no instante da decisão ( $t = t_d$ ). Um resumo sobre as atitudes de risco para cada atributo pode ser consultado na Tabela 7. Entretanto, a segunda parte do procedimento de elicitación via PTT (veja Figura 17-B) revela que o decisor é impaciente ao lidar com consequências futuras. Deve-se notar que perdas menores, isto é, mais desejáveis, tendem a ser menos penalizadas pelo atraso. Na verdade, a dependência de magnitude das taxas de desconto  $r_x$  é detectada de forma similar em todos os outros atributos.

Por fim, o NSMAUT permite ao decisor estabelecer preferências relativas entre os atributos sob uma racionalidade compensatória, de modo que a elicitação das constantes de escala  $k_{atr}$  com o MAUT, já realizadas na aplicação anterior, serão usadas aqui. Isso é crucial para reunir as informações de risco e fornecer a priorização do risco de forma adequada:  $k_{amb} = 0,127$ ,  $k_{fin} = 0,095$ ,  $k_{hum} = 0,351$ ,  $k_{mob} = 0,247$  e  $k_{soc} = 0,181$ .

Assim, o risco multiatributo é obtido após o cálculo, sob as preferências do decisor, da interação entre os componentes de risco: os cenários de perigo e suas potenciais consequências ao longo do tempo. Em seguida, para cada zona urbana, um índice de risco global representa a magnitude média dos riscos de inundação (equação 22) a cada vinte anos até 2100. Essa configuração de tempo deve ser estabelecida pelos órgãos de monitoramento, na prática. A Tabela 12 resume a classificação de risco de inundação urbana para esta janela de tempo. Para fins didáticos, a Tabela 12 também contém a priorização de risco utilizando o MAUT clássico. Essas informações tabulares se concentram na dinâmica de priorização de riscos, na magnitude relativa das zonas adjacentes no ranking e no gradiente de risco (derivadas parciais em relação ao  $t$ ). Em suma, informações úteis podem ser extraídas do NSMAUT para investigar múltiplas questões que podem ajudar os decisores a tomar decisões estratégicas e de longo prazo.

A partir de riscos ambientais, financeiros, humanos, de mobilidade e sociais com as equações 21 e 22, as constantes de escala com o NSMAUT reúnem essas múltiplas perspectivas no mapeamento de riscos disposto na Figura 18. Em linhas gerais, permite ao decisor avaliar como a priorização do risco é distribuída espacialmente. A partir dos resultados, é muito importante estabelecer diretrizes importantes para os gestores para estruturar estratégias de longo prazo para combater os riscos de inundação.

Inicialmente, tanto a Tabela 12 quanto a Figura 18 alocam as zonas urbanas mais críticas para as primeiras posições do ranking. Assim,  $a_7$  é a zona mais crítica para as próximas quatro décadas; por outro lado,  $a_{16}$  assume a primeira posição de 2060 a 2100. Enquanto isso,  $a_{11}$  tem a menor prioridade ao planejar medidas estratégicas de adaptação durante todos os horizontes de tempo.

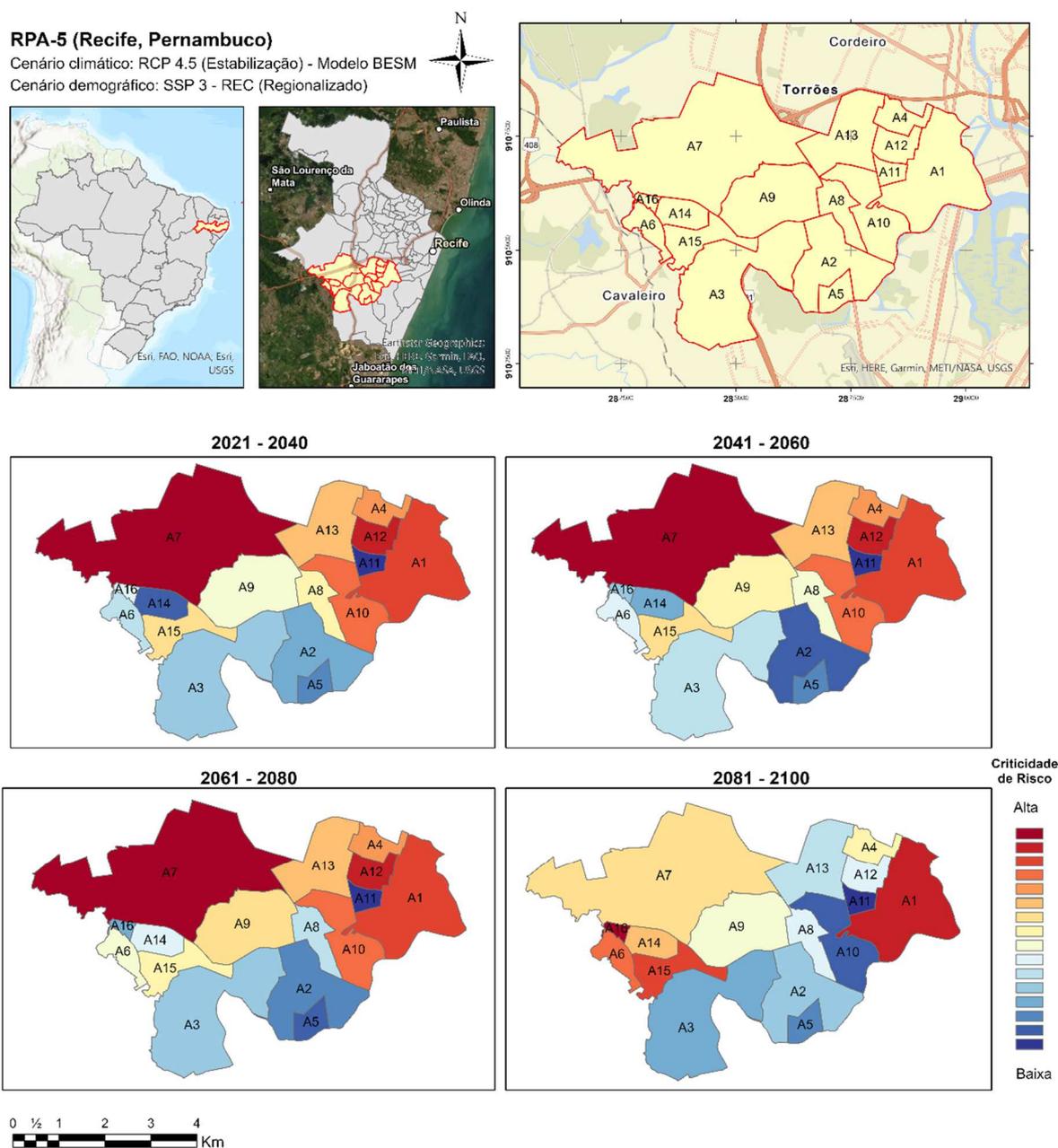
Tabela 12 – Ranking de Risco de Inundação Urbana e índices de magnitude relativa (RMI) para 2021-2100 com o NSMAUT

Ranking de priorização	Abordagem estacionária: método MAUT <sup>7</sup>		Abordagem não estacionária: método NSMAUT							
	2021-2100		2021-2040		2041-2060		2061-2080		2081-2100	
	Zona urbana	IMR	Zona urbana	IMR	Zona urbana	IMR	Zona urbana	IMR	Zona urbana	IMR
<b>1</b>	$a_7$	6,06	$a_7$	1,90	$a_7$	0,06	$a_{16}$	2,01	$a_{16}$	7,75
<b>2</b>	$a_{12}$	1,41	$a_{15}$	1,55	$a_{16}$	0,55	$a_{15}$	7,02	$a_1$	2,60
<b>3</b>	$a_1$	0,18	$a_{16}$	0,55	$a_{15}$	1,64	$a_1$	1,36	$a_{15}$	0,07
<b>4</b>	$a_{10}$	2,03	$a_1$	2,13	$a_1$	0,96	$a_6$	0,07	$a_6$	0,89
<b>5</b>	$a_4$	11,58	$a_{12}$	7,29	$a_6$	1,35	$a_7$	1,01	$a_8$	20,44
<b>6</b>	$a_{13}$	1,08	$a_6$	0,37	$a_8$	2,37	$a_8$	6,47	$a_{14}$	0,21
<b>7</b>	$a_{15}$	0,41	$a_8$	0,63	$a_{12}$	0,24	$a_{14}$	0,23	$a_7$	0,97
<b>8</b>	$a_8$	3,52	$a_{14}$	0,91	$a_{14}$	6,32	$a_{12}$	5,21	$a_4$	2,01
<b>9</b>	$a_9$	0,72	$a_{13}$	52,13	$a_4$	7,39	$a_4$	0,25	$a_9$	0,14
<b>10</b>	$a_{16}$	8,31	$a_4$	0,04	$a_{13}$	0,26	$a_9$	4,10	$a_{12}$	7,99
<b>11</b>	$a_6$	0,06	$a_2$	0,47	$a_9$	0,07	$a_2$	0,14	$a_{13}$	0,16
<b>12</b>	$a_3$	5,04	$a_9$	0,05	$a_2$	0,16	$a_{13}$	0,15	$a_2$	0,15
<b>13</b>	$a_2$	0,85	$a_3$	13,43	$a_3$	10,44	$a_3$	4,01	$a_3$	2,75
<b>14</b>	$a_5$	0,11	$a_{10}$	0,27	$a_5$	0,38	$a_5$	1,00	$a_5$	1,11
<b>15</b>	$a_{14}$	-	$a_5$	-	$a_{10}$	-	$a_{10}$	-	$a_{10}$	-
<b>16</b>	$a_{11}$	-	$a_{11}$	-	$a_{11}$	-	$a_{11}$	-	$a_{11}$	-

Fonte: O Autor (2022).

<sup>7</sup> Aplicando o modelo de da Silva, Alencar & de Almeida (2022a) que significa: aplicação do GEV(0,0,0), sem trajetórias socioeconômicas com a SSP, e sem taxas de desconto nas funções de utilidade.

Figura 18 – Mapeamento de Risco Multidimensional de Inundação Urbana do Recife (RPA-5) para 2021 – 20100 nos cenários RCP 4.5 e SSP3.



Fonte: O Autor (2022).

#### 4.2.2 Resultados e discussão

Ao comparar os resultados do NSMAUT com o MAUT clássico, novas contribuições podem ser evidenciadas para o contexto de FRM. Tendo isso em mente, o gradiente de risco

$\frac{\partial r_{a_i,t}^{global}}{\partial t}$  no NSMAUT contribui alternativamente para detectar o aumento relativo de risco entre as alternativas. Na prática, a equipe de decisão pode acompanhar a tempo o crescimento

relativo do risco entre as zonas urbanas, orientando quando é melhor implementar medidas de adaptação.

À medida que o gradiente de risco diminui, isso significa que o decisor e sua equipe de decisão devem mitigar seus riscos mais cedo, como observado em  $a_7$ . Caso contrário,  $a_1$  ilustra o caso de que o aumento dos valores do gradiente de risco exige mais esforços para mitigar riscos, o que significa uma oportunidade de adotar medidas antecipadas para reduzir ainda mais os impactos dos riscos no futuro. Aqui, a análise não estacionária permite ao decisor prever quais serão as zonas mais críticas no futuro se nenhuma ação preventiva for implementada para adaptação climática.

Deve-se notar que o método clássico não permite uma análise dinâmica do risco de inundação ao longo do tempo, ou seja, o decisor captura uma perspectiva média em termos de EU a longo prazo (2021-2100). Por outro lado, os resultados do NSMAUT introduzem um diagnóstico "em tempo real" da criticidade urbana, especialmente na interpretação desse índice de gradiente.

Com foco na redução das consequências desse risco natural, o modelo fornece uma análise útil sobre como implementar as melhores estratégias de mitigação sob recursos escassos (financeiro, técnico, humano e outros). É por isso que os índices de IMR são informações valiosas para a tomada de decisões em diferentes horizontes temporais. Por exemplo, para o período de curto prazo (2021-2040), a magnitude relativa de  $a_{13}$  é aproximadamente 52 vezes maior que a de  $a_4$ . Na prática, o decisor percebe que seus riscos são díspares. Portanto, se não conseguir mitigar todas as regiões, pode haver uma regra de decisão que aloca recursos de forma eficiente para zonas urbanas, pelo menos tão críticas quanto  $a_{13}$ . Ao comparar com o MAUT clássico, a análise técnica da alocação de recursos é limitada porque o decisor não foi capaz de discretizar a priorização do risco em diferentes períodos, conforme feito pelo NSMAUT. Consequentemente, as medidas adaptativas estão sujeitas a uma ordem genérica de criticidade que pode valer a pena se não há muita informação disponível. Por outro lado, a riqueza de informações do NSMAUT busca aprimorar significativamente esta questão.

O mapeamento de riscos esquematizado na Figura 18 também pode ser usado para desagregar a análise sobre os riscos das perspectivas ambientais, financeiras, humanas, de mobilidade e sociais, conforme modelado nas equações 21 e 22. Assim, o decisor pode avaliar o *ranking* de risco para um determinado atributo, e a desagregação do mapeamento em múltiplos riscos tem o potencial de adicionar evidências espaciais sobre a proeminência de um determinado risco em determinadas zonas urbanas. Essas informações podem ajudar os

decisores, formuladores de políticas públicas, gestores e outros profissionais a projetar medidas estruturais e não estruturais inovadoras que envolvam muitas partes interessadas no fortalecimento da resiliência urbana contra inundação. Desse modo, a desagregação da análise de risco ao longo do tempo tem potencial de gerar informações complementares para os atores do processo. Os resultados mensais de risco detectaram cerca de 180 *rankings* diferentes no momento  $t \in [t_d, t_d + T]$ . Uma vez que a estacionariedade conduz o MAUT clássico, não é possível obter tais informações enriquecidas, de modo que apenas um *ranking* seja obtido no processo de tomada de decisão. Assim, a perspectiva não estacionária se insere na análise de risco de inundação urbana, tanto pela influência do clima quanto dos efeitos socioeconômicos, para que possa detectar "eventos surpreendentes" ao longo do tempo (AVEN, 2020). Além disso, o NSMAUT introduz a partir de projeções regionalizadas a notável influência dos SSPs e o crescente fenômeno de impaciência do decisor no *ranking* de resultados. É isso que este método aborda precisamente, a combinação das novas fontes de dependência de tempo para prever, controlar e monitorar os riscos de inundação.

Além disso, a discretização do risco ao longo do tempo pode evidenciar efeitos sazonais de enchentes, alertando assim para a necessidade de tomar uma decisão sobre qual o momento estratégico no ano no qual o decisor deve concentrar sua atenção. Uma breve análise com um teste estatístico pareado foi aplicada para verificar se os riscos de inundação no período chuvoso são maiores do que a estação seca em Recife, analisando a diferença entre as medidas de risco com  $H_0: r_{a_i,t}^{global}_{chuvoso} - r_{a_i,t}^{global}_{seco} \leq 0$ . A hipótese nula foi rejeitada ao nível de confiança de 95%, o que revela a necessidade de concentração e fortalecimento de ações emergenciais ou preventivas entre março e julho do local de estudo.

### 4.3 Síntese do Capítulo

Os resultados desta aplicação numérica foram validados com o relatório local de risco climático (Recife, 2019), reforçando que a região RPA-5 tenderá a ser mais afetada por riscos de desastres naturais e será agravada não só pelo impacto direto do evento, mas também por seus desdobramentos em outros eventos indesejados, como deslizamentos de terra. Após a aplicação do novo modelo de avaliação dos riscos de inundação, essa análise cruzada de riscos sob a combinação de diferentes cenários de RCP e SSP contribui para justificar a percepção de risco do decisor, tornando a decisão recomendada ainda mais confiável com o método NSMAUT.

Conseqüentemente, os benefícios das ações de mitigação a serem implementadas pelos formuladores de políticas públicas funcionam de forma a evitar futuros danos causados por enchentes agravados pelas mudanças climáticas e pela urbanização. O decisor e sua equipe de decisão poderiam usar a ampla gama de informações do NSMAUT para orientar como e onde aplicar as principais metas de adaptação para o resto deste século, de acordo com os planos de adaptação às mudanças no clima local (ICLEI, 2020).

Por fim, deve-se esclarecer que os aspectos gerenciais relacionados à implementação da abordagem NSMAUT não devem substituir as práticas existentes de FRM, como análise hidrológica e previsão climática/socioeconômica, mas integrar essas práticas de forma que o novo método possa apoiar decisões estratégicas a fim de instrumentalizar o desenvolvimento sustentável. Assim, o decisor deve analisar periodicamente as recomendações relativas aos resultados reais, acompanhando os cenários climáticos e socioeconômicos vigentes, para que possa adaptar estratégias em tempo real. Ademais, a análise com o NSMAUT pode ser replicada para qualquer combinação de cenários climático (RCP) e socioeconômico (SSP).

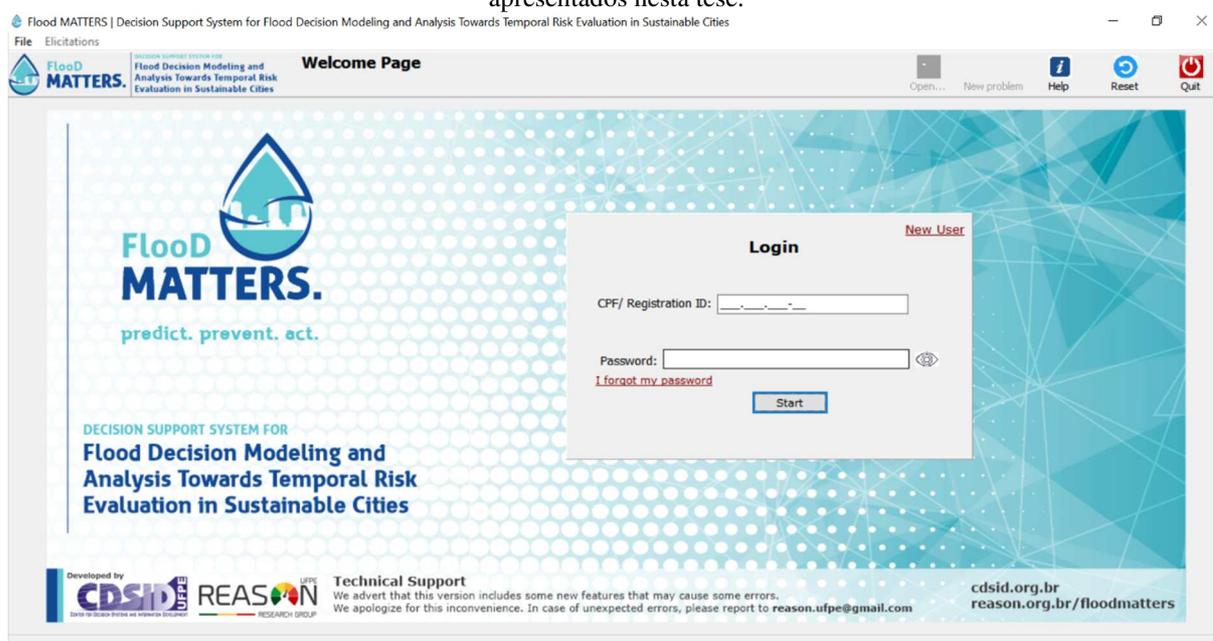
Nesse sentido, cabe destacar a importância do desenvolvimento e uso de um sistema informatizado para implementação computacional do novo método abordado neste capítulo. Assim como mencionado no capítulo 3, esta tese proporcionou uma contribuição adicional ao integrar os modelos propostos neste trabalho de forma colaborativa e estratégica por meio do *SAD Flood MATTERS*, sobre o qual o capítulo a seguir detalha suas características, funcionalidades e potencialidades para tomada de decisão real em cidades sustentáveis.

## 5 SISTEMA DE APOIO A DECISÃO PARA GERENCIAMENTO DE RISCOS DE INUNDAÇÕES: A PLATAFORMA COLABORATIVA *FLOOD MATTERS*

A partir da necessidade de automatizar e facilitar o processo decisório por meio de uma ferramenta computacional para aplicação dos modelos propostos nos capítulos anteriores, foi estruturado um sistema de apoio a decisão (SAD) cujos elementos e funcionalidades foram desenhados de tal forma que instrumentalizem, de forma prática, as complexas demandas oriundas desse problema de decisão.

O SAD é intitulado *Flood MATTERS: Decision Support System for Flood Decision Modeling and Analysis Towards Temporal Risk Evaluation in Sustainable Cities*, cuja versão final está em processo de registro no Instituto Nacional de Propriedade Industrial (INPI), no aguardo de retorno de sua publicação oficial. A Figura 19 ilustra a interface de acesso ao SAD, cuja estrutura e modulação será detalhada em seguida.

Figura 19 – Apresentação da interface de acesso do SAD para análise de risco com base nos modelos de risco apresentados nesta tese.

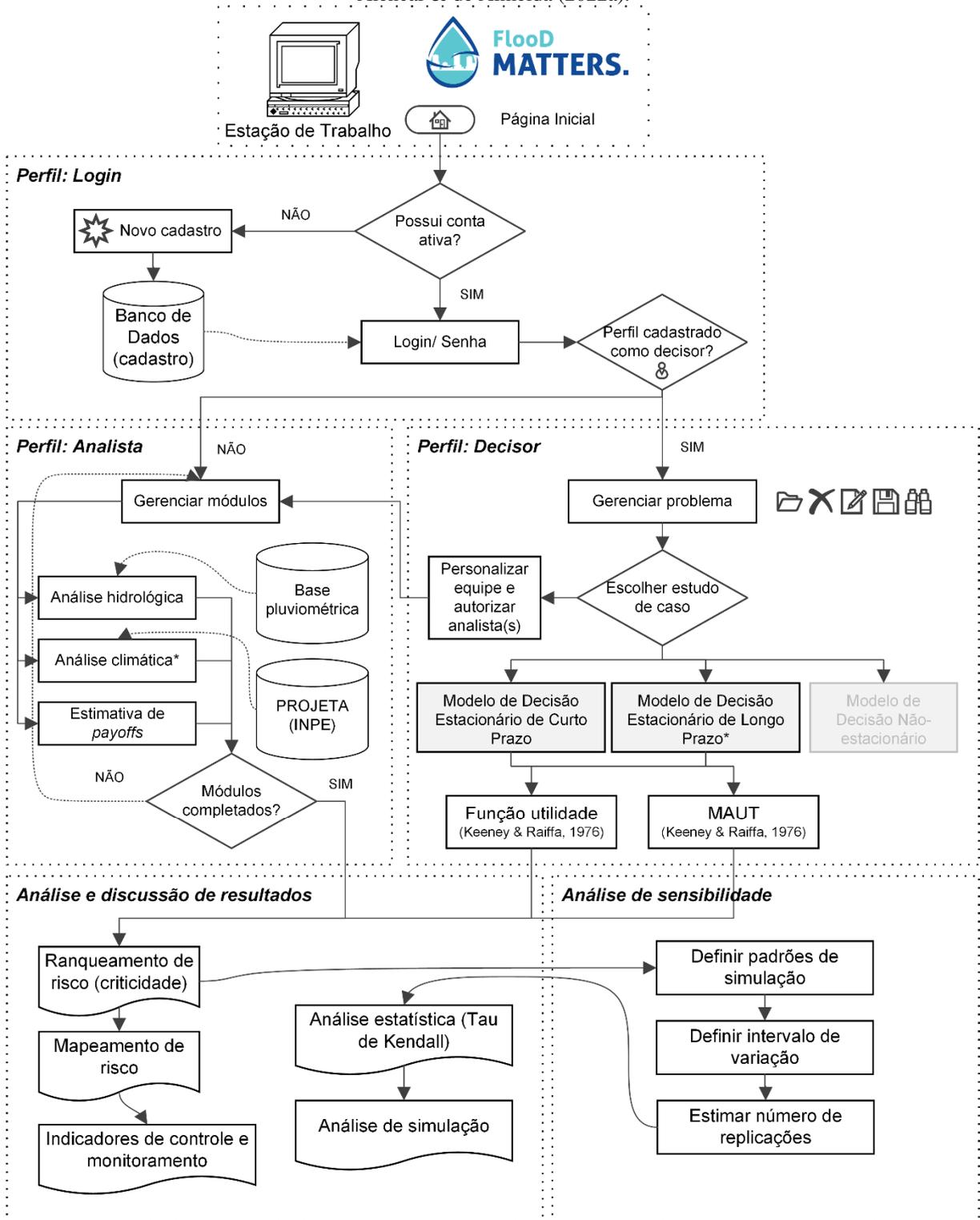


Fonte: adaptado de de Almeida;da Silva & Alencar (2022).

O sistema, desenvolvido como contribuição adicional deste trabalho à sociedade, busca explorar em sua arquitetura diversos aspectos funcionais, como simplicidade, consistência, familiaridade, informatividade e flexibilidade. Assim, espera-se que o SAD esclareça ao usuário/ decisor, em meio às informações dispostas, o razoável grau de credibilidade para a

tomada de decisão, refletindo a satisfação do usuário com os resultados e ferramentas apresentadas (CHEN; KOUFARIS, 2015).

Figura 20 – Fluxograma de funcionalidades do SAD para análise e priorização de riscos de inundação, análise de sensibilidade e exportação de resultados com base nos modelos estacionários de da Silva et al. (2020) e da Silva, Alencar & de Almeida (2022a).



Fonte: adaptado de de Almeida;da Silva & Alencar (2022).

Para tanto, o plano de projeto contemplou a construção de um *software* desenvolvido no Ambiente Delphi 2010, utilizando a linguagem de programação *Object Pascal* (veja Figura 20).

Embora esteja voltada para uma aplicação *stand-alone*, espera-se que o SAD seja aplicado e utilizado simultaneamente pelos diversos atores do processo decisório por meio de um servidor intranet, cuja conexão entre as estações de trabalho permitam em tempo real a atualização de informações necessárias para aplicação dos modelos de risco apresentados nos capítulos 3 e 0. Como exemplo, encoraja-se a aplicação da ferramenta desenvolvida entre as prefeituras municipais sob constante monitoramento dos órgãos de controle estaduais, a fim de subsidiar políticas públicas de gestão de desastres adequadas ao contexto regional.

O sistema está disponível em sua versão piloto mediante solicitação nos endereços eletrônicos dos laboratórios de pesquisa CDSID ([www.cdsid.org.br](http://www.cdsid.org.br)) e REASON ([www.reason.org.br/floodmatters](http://www.reason.org.br/floodmatters)), enquanto parceiros no desenvolvimento deste produto.

O SAD faz integração com bibliotecas gráficas (*TeeChart*<sup>®</sup>) e não possui consideráveis requisitos computacionais: instalação do pacote *Microsoft Office*<sup>®</sup> com acesso ao banco de dados *Access* e planilhas *Excel*. A Figura 20 esquematiza as principais funcionalidades do SAD *Flood MATTERS*, demonstrando assim as relações entre os diversos módulos de programação, bem como a sequência de procedimentos a serem implementados até a etapa final de proposição da recomendação ao decisor.

Didaticamente, o *software* será apresentado de acordo com as três grandes fases para a resolução do problema: gestão dos perfis de usuários e a importação dos dados de entrada (item 5.1); elicitação de preferências do decisor (item 5.2); e análise, discussão e exportação dos resultados (item 5.3).

### 5.1 Gestão de usuários e importação de dados

Primeiramente, faz-se necessário que o usuário se cadastre na plataforma a partir de um formulário que identifica qual o perfil desejado por ele, isto é, se o usuário será decisor ou analista no SAD. A partir disso, o módulo de gestão de usuários é responsável por permitir/restringir o acesso de módulos específicos, a depender do seu perfil escolhido. Isto é importante pois permite que a aplicação prática do sistema em casos reais seja potencializada pelo compartilhamento adequado de informação entre os atores do processo já na etapa de *input* dos dados.

Por esta razão, o *Flood MATTERS* se trata de uma plataforma multicolaborativa, no qual o usuário de perfil “decisor” possui a flexibilidade de criar/ atualizar o seu estudo de caso

(veja Figura 21), escolhendo qual o modelo de risco usado como base, além de referenciar espacialmente o seu local de estudo e de montar a sua equipe de decisão, composta por um ou mais analistas que já estejam previamente cadastrados no banco de dados.

Sendo assim, o sistema permite a interação de profissionais de diversas áreas de conhecimento, previamente habilitados a fornecerem informações estratégicas da caracterização do regime pluviométrico e/ou climático da região de estudo, por exemplo. Como desdobramento natural, o espírito colaborativo coordenado pelo líder do time, isto é, o usuário-decisor, gera aprendizado entre toda a equipe, uma vez que a complementação de informações através de diferentes pontos de vista sobre o problema da inundação possibilita ressignificar a percepção de risco e as prioridades da administração pública frente a um possível desastre natural em meio urbano.

É importante destacar, conforme observado na figura acima, que um usuário-decisor pode construir múltiplos estudos de caso, desde que sejam informados e detalhados manualmente ou via planilha *MSExcels* dados relativos ao conjunto de alternativas (zonas urbanas), modelo de risco a ser usado como referência para análise, gestão da equipe de decisão e lista de permissão de acesso por módulos específicos, entre outras informações.

Figura 21 – Tela de criação de um estudo de caso e gestão de equipe para análise de risco no perfil usuário-decisor.

The screenshot shows the 'Flood MATTERS' software interface. At the top, it says 'Flood MATTERS | Decision Support System for Flood Decision Modeling and Analysis Towards Temporal Risk Evaluation in Sustainable Cities'. Below that, the user is identified as 'User: Mr. Lucas Borges' and the module is 'Decision-Maker Module'. The main window is titled 'Choose problem' and is split into two panes: 'Set new problem' and 'Load problem'.

**Set new problem:**

- Name your problem/ location:** A text input field.
- Number of urban zones:** A dropdown menu.
- Model Selection:** Three radio button options:
  - Model 1: Stationary Decision Model for Assessing Urban Flood Risks in a Short-Term Perspective with MAUT and Decision Analysis
  - Model 2: Stationary Decision Model for Assessing Urban Flood Risks under Climate Change - a Long-Term Perspective with MAUT and Decision Analysis
  - Model 3: Non-stationary Decision Model for Assessing Urban Flood Risks under Climate Change with NSMAUT
- Code and Alternative Name table:**

Code	Alternative Name
A1	Afogados
A2	Areias
A3	Barro
A4	Bongi
A5	Capote
A6	Coqueiral
- Import GIS layer (.kml; .dxf; .gis):** A search field and a 'Reset' button.
- Buttons:** 'Set and Load'.

**Load problem:**

- Follow the instruction below:** A text box with instructions: 'If there is a problem registered in the system, select the one of your interest that will be studied from now on. Note that problems that have been resolved are were assigned in the status field.' Below this is a 'Summary of problems:' section listing 'Recife (RPA-5)\_Model1', 'Recife (RPA-5)\_Model2', and 'Recife (RPA-5)\_Model3'.
- Form fields:**
  - Site Study / Location:** 'Recife (RPA-5)\_Model1'
  - Number of urban zones:** '16'
  - Model Specification:** 'Model 1: Stationary Decision Model for Assessing Urbk'
  - Status:** 'In progress'
- Buttons:** 'Load'.

At the bottom, there is a footer with logos for 'CDSID UFPE REAS UFPE' and 'Technical Support' information, including the website 'cdsid.org.br' and 'reason.org.br/floodmatters'.

Fonte: adaptado de de Almeida;da Silva & Alencar (2022).

Dessa forma, o foco do perfil decisor está não só no monitoramento das informações fornecidas por analistas de diversas áreas do conhecimento, como também no estabelecimento

das suas preferências em termos de funções utilidade e constantes de escala. Isto será mais bem detalhado no item 5.2.

Em contraponto, o perfil usuário-analista contempla um conjunto de três módulos do SAD, cujo acesso depende da estrita autorização por parte do decisor (líder da equipe de decisão). Entre eles, pode-se citar a estimativa hidrológica e/ou climática dos padrões de precipitação, com definição dos cenários de perigo, cálculo das probabilidades *a priori*, medição de desempenho dos modelos de previsão climática etc., além da estimativa dos *payoffs* em termos de funções de distribuição de probabilidade.

Sendo assim, somente após o devido preenchimento de todos os dados relativos ao *input* das informações, incluindo a elicitación de preferências, será possível ao decisor aplicar o modelo de risco escolhido para posterior análise dos resultados. Cabe ressaltar que um modelo de risco não-estacionário, apresentado no capítulo 4, também pode ser ferramenta para avaliação de risco, conforme explanado no item 5.4.

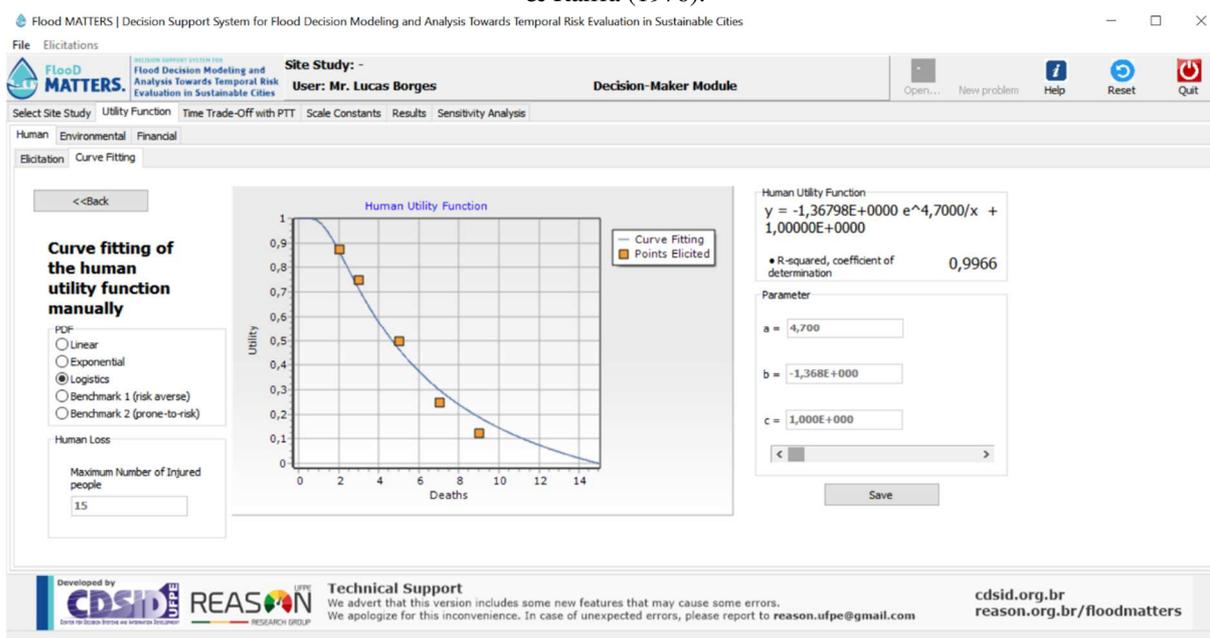
## 5.2 Elicitación das preferências do decisor

Este módulo é exclusivo ao perfil de usuário-decisor, de modo personalizado ao problema em estudo, sendo automaticamente habilitado para que o usuário expresse suas preferências intracritério e intercritério por meio da interação com o SAD. Portanto, é uma condição *sine qua non* para uma análise multiatributo dos riscos de inundação. Para cada atributo de decisão, o módulo dispõe de um procedimento de elicitación separado, com instruções sobre a sequência de perguntas e posterior determinação do formato da função utilidade que melhor traduz as preferências do decisor, conforme pode ser observado na Figura 22.

Com auxílio gráfico, o ajuste de curva é efetuado de modo a obter o menor coeficiente de determinação ( $R^2$ ) para os dados, aprimorando assim a representação da utilidade estabelecida pelo decisor para o atributo em questão. Do exemplo ilustrativo da Figura 22, por exemplo, nota-se que a curva logística representa um bom ajuste de curva ( $R^2 = 0,9966$ ) aos pontos elicitados do atributo humano. Entretanto, o SAD dispõe de outras funções como a linear, exponencial e aquelas propostas (*benchmarks*) nas equações 6 e 7.

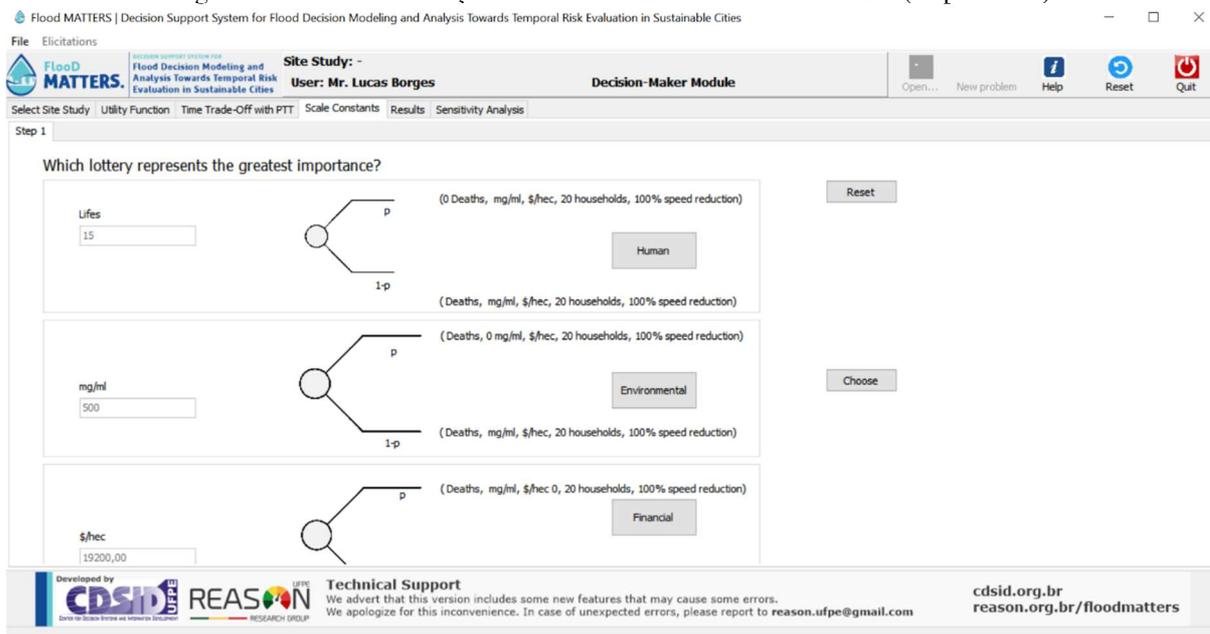
Por fim, a avaliação intercritério finaliza esta etapa de elicitación, com a obtenção das constantes de escala por meio de um procedimento iterativo do MAUT (KEENEY; RAIFFA, 1976) em duas partes, como detalhado no item 3.1.8 e ilustrado na Figura 23.

Figura 22 – Tela de ajuste de curva da função utilidade após processo de elicitación com o protocolo de Keeney & Raiffa (1976).



Fonte: adaptado de de Almeida;da Silva & Alencar (2022).

Figura 23 – Tela de elicitación das constantes de escala com MAUT (etapa inicial).



Fonte: adaptado de de Almeida;da Silva & Alencar (2022).

A figura acima ilustra a etapa de ordenação de consequências estocásticas hipotéticas, pelas quais o decisor estabelece uma relação de importância relativa entre as constantes de escala dos atributos elencados no problema. O algoritmo implementado neste módulo, portanto, faz uso das respostas emitidas pelo decisor para estruturar perguntas sucessivas sobre dois cenários catastróficos hipotéticos, a partir dos quais o decisor seja indiferente entre

ambos. Como abordado no item 3.1.8, um sistema de equações possível e determinado leva o SAD a calcular as constantes de escala, necessárias para garantir o processo de agregação de riscos numa perspectiva multiatributo.

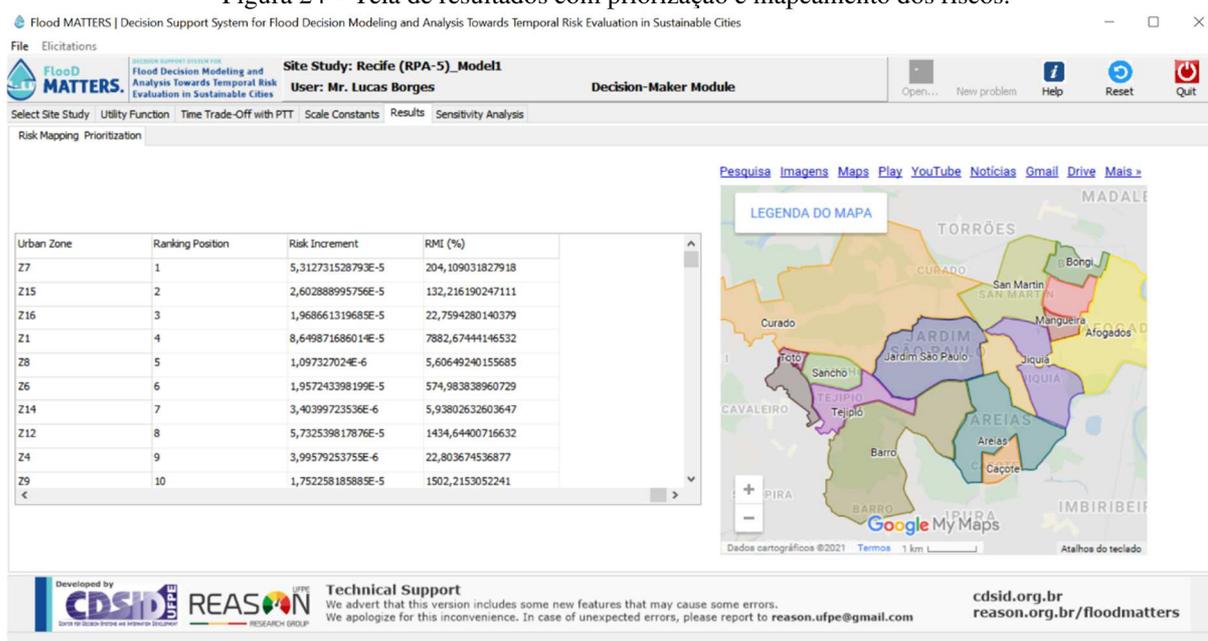
É importante pontuar também que resultados prévios de elicitación de preferências que eventualmente foram usados em estudos anteriores são salvos pelo *software*, de modo que o usuário-decisor possui a liberdade de escolher se mantém sua estrutura de preferências como está, ou se prefere refazer todo o processo devido a evidências de que suas preferências mudaram com o tempo.

### 5.3 Análise de resultados e de sensibilidade com exportação de resultados

Por fim, o *Flood MATTERS* dispõe ao usuário-decisor outros dois módulos importantes que correspondem à fase de análise e discussão de resultados. A partir da definição das preferências do decisor e das informações factuais registradas pelo(s) analista(s) sobre o fenômeno hidrológico, estimativas das consequências e modelagem dos perigos, o SAD processa, conforme o modelo de risco escolhido e o cenário climático em questão, todos os cálculos envolvendo as perdas, consequências e riscos associados a cada atributo em suas respectivas alternativas.

Com isso, é possível emitir um relatório de priorização de risco multidimensional, que pode ser acessado/ exportado em planilha *MSExcel* pelo decisor de forma tabular ou georreferenciada, isto é, com um mapeamento de risco objetivo e acessível (veja Figura 24).

Figura 24 – Tela de resultados com priorização e mapeamento dos riscos.



Fonte: adaptado de de Almeida;da Silva & Alencar (2022).

Posteriormente à análise preliminar, o *software* apresenta o módulo de análise de sensibilidade, quando o decisor tiver a necessidade de prosseguir com uma análise mais apurada dos resultados previamente encontrados em meio aos cenários de previsão climática. Isso contém:

- a parametrização da AS, definindo o número de replicações e os padrões de simulação a partir da combinação de três componentes de variabilidade (climática, das consequências e das atitudes do decisor ao risco);
- a estatística descritiva sobre o coeficiente de correlação de *Kendall*, com teste de hipótese sob os valores médios encontrados; e
- análise de simulação, com a geração de informações gráficas referentes às priorizações obtidas nas replicações, quando comparadas à recomendação inicial.

Desse modo, o produto tecnológico acima descrito visa enriquecer as análises e reforçar o caráter inovador deste trabalho com uma disseminação da aplicação numérica em cidades brasileiras e estrangeiras dos modelos propostos neste capítulo, cuja escolha do modelo deve obedecer às limitações de dados à disposição da equipe de decisão.

Cabe destacar ainda que não somente os modelos de risco estacionários propostos no capítulo 3, mas também o novo método NSMAUT para análise espacial e temporal dos riscos de inundação, com o uso de técnicas estatísticas e armazenamento de dados climáticos, como pode ser visto no item a seguir.

#### 5.4 Integração do modelo NSMAUT no sistema *Flood MATTERS*

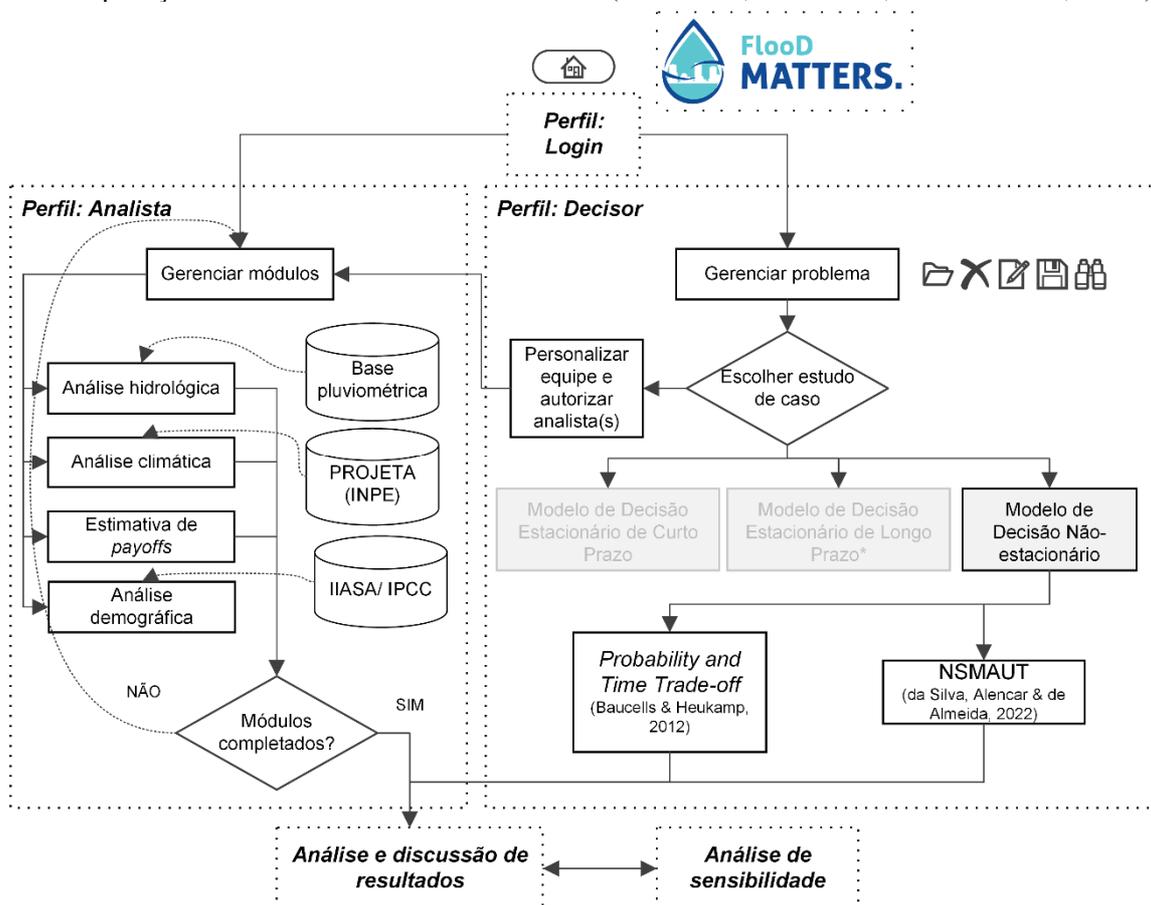
O SAD *Flood MATTERS*, desenvolvido como produto tecnológico para apoio a este trabalho e cujas funcionalidades/ características relevantes foram detalhadas nos itens anteriores, também insere em seu escopo a possibilidade de o usuário-decisor modelar seu problema com o método NSMAUT, descrito no capítulo 4. Para tanto, a Figura 25 esquematiza os módulos inseridos no *software* que permitem o uso dessa nova abordagem no contexto prático.

A partir da página inicial do SAD, cabe ao decisor, durante a montagem da equipe de decisão e caracterização do problema, definir como modelo de análise de risco a perspectiva não estacionária com o NSMAUT. Em decorrência disso, novos módulos são disponibilizados para os especialistas, a depender da autorização dada pelo decisor, enquanto gestor do time no próprio sistema. Conforme descrito na seção anterior, é inserido no módulo de análise climática (veja item 4.1.1) todo o processo de estimação dos parâmetros da distribuição GEV

de acordo com a técnica do MLE. A partir dos modelos não-estacionários de probabilidade *a priori* previamente definidos, todo o algoritmo para a estimação por máxima verossimilhança, bem como as estatísticas do AIC, BIC e teste estatístico da razão da verossimilhança são disponibilizados ao decisor a fim de que ele fundamente a melhor função  $\pi(\theta, t)$ .

De forma análoga, o módulo de estimação das consequências insere a não-estacionariedade de acordo com as projeções de Hewitt et al. (2021) através da base de dados disponibilizada pelo Instituto Internacional de Análise de Sistemas Aplicados - IIASA ([tntcat.iiasa.ac.at/SspDb](http://tntcat.iiasa.ac.at/SspDb)) após a regionalização das previsões demográficas com a técnica de Wear & Prestemon (2019).

Figura 25 – Fluxograma de funcionalidades do SAD para análise e priorização de riscos de inundação e exportação de resultados com base no NSMAUT (DA SILVA; ALENCAR; DE ALMEIDA, 2022b).



Fonte: O Autor (2022).

Por fim, a elicitación de preferência com o procedimento PTT é rigorosamente aplicado no SAD, como pode ser observado na Figura 26. De forma intuitiva, a função utilidade e suas respectivas taxas de desconto são obtidas para que a dinâmica temporal seja incluída nas preferências do decisor.

Devido à complexidade computacional para o cálculo dos índices de risco devidamente definidos pelas equações 21 e 22, cabe destacar a eficiência na economia de tempo e esforço com a implementação no algoritmo de técnicas de integração por métodos numéricos, como o de Newton-Cotes para integração dupla. De fato, a quantidade de dados a serem processados na fase de avaliação de riscos é considerável, de modo que o SAD demanda um certo tempo para a geração dos resultados globais. Apesar disso, o sistema foi desenvolvido cuidadosamente a partir da conciliação entre a precisão dos cálculos e a otimização do tempo de processamento, sem prejuízos a tomada de decisão e/ou interpretação dos resultados.

Figura 26 –Esquema do processo de elicitación com o PTT no método NSMAUT no SAD FlooDMATTERS.

The screenshot displays the 'Elicitation' module of the FloodMATTERS software. The main window is titled 'Utility Function for the Human criterion'. It contains the following elements:

- Instructions about the elicitation process:** A text block explaining the TO method and its application in RDU, detailing the process of finding the maximum loss between sections of the pipeline and the iterative nature of the elicitation process.
- Underlying elicitation parameters:** A form with input fields for:
  - X0: 0
  - X1: 15
  - Delta, Δ: 3
  - r: 15
  - R: 18
  - probability, p: 1/2
- Decision Tree:** A visual representation of two hypothetical situations, A and B, each with a 1/2 probability of leading to a certain number of deaths.
  - Lottery A:** 1/2 chance of 7 deaths and 1/2 chance of 18 deaths.
  - Lottery B:** 1/2 chance of 8 deaths and 1/2 chance of 15 deaths.
- Parameter Value Table:** A table on the right side of the interface showing the values for parameters x0 through x6.
 

Parameter	Value
x0	0
x1	2
x2	3
x3	5
x4	7
x5	
x6	15
- Buttons:** 'Begin', 'Choose', and 'Reset' buttons are visible.

The footer of the software includes logos for CDSID, REASON, and UFPE, along with technical support information and website links (cdsid.org.br, reason.org.br/floodmatters).

Fonte: O Autor (2022).

Ademais, o módulo de resultados e discussão apresenta não só o mapeamento dinâmico de risco, como também os indicadores de IMR e gradiente de risco para complementar as informações necessárias para uma tomada de decisão consolidada.

Sendo assim, o SAD proposto não só contribui para reforçar e validar as propostas de modelagem de risco, como permitem, por seus recursos visuais e estatísticos compartilhar novos *insights* para o planejamento da adaptação urbana contra inundações.

## 6 CONCLUSÕES E DIRECIONAMENTOS PARA TRABALHOS FUTUROS

Os diferentes órgãos responsáveis pela gestão de desastres urbanos devem elaborar e implementar uma visão integrada e ampla da gestão de riscos com o objetivo de alcançar uma boa governança frente às mudanças climáticas. Esses atores devem levar em consideração os objetivos e limitações não apenas dessas organizações, como também daqueles *stakeholders* cuja influência é perceptível e relevante para a tomada de decisão.

Nessa seara, à luz da abordagem do MCDM/A, este trabalho apresentou, sob diferentes perspectivas, modelos de decisão georreferenciados para avaliar e classificar os riscos de inundação em áreas urbanas devido às mudanças climáticas e aos efeitos da urbanização. Fundamentadas por uma análise crítica de artigos recentes na literatura sobre os principais desafios das práticas de gerenciamento de inundação aliadas ao efeito combinado da mudança climática e do crescimento populacional, as premissas dos três modelos apresentados buscam capturar a interação entre a variabilidade climática na alteração dos padrões de temperatura, precipitações, aumento do nível do mar e outros índices climáticos.

A seguir, são detalhadas algumas considerações finais após a proposição e aplicação dos modelos de decisão com o desenvolvimento de um produto tecnológico.

### 6.1 Considerações Finais

Primeiramente, a análise de risco estacionário, no qual se assume que a variação temporal dos fatores-chave não tem correlação significativa com a frequência/ intensidade do evento hidrológico, os modelos de curto e longo prazo integram as abordagens MAUT e Análise de Decisão. Desse modo, a estrutura axiomática dos modelos busca calcular danos e agregar riscos sob cinco atributos, que lidam com questões ambientais, financeiras, humanas, de mobilidade e sociais simultaneamente. Com o uso de informações acessadas em bases de dado abertas, os modelos são flexíveis e podem ser aplicado em qualquer área urbana do mundo, desde que atenda aos pressupostos detalhados no capítulo 3.

Já numa perspectiva não estacionária, o novo método, NSMAUT, leva em conta uma abordagem probabilística para modelar a frequência das inundações, a fim de detectar dependência temporal sobre tendências e variabilidade das inundações. Assim, o capítulo 4 engloba modelos de previsão que predizem o crescimento urbano e a variabilidade climática, a fim de quantificar a influência temporal sobre as consequências das enchentes sob os cinco atributos, e insere as atitudes em relação à distância psicológica induzidas por atrasos na

modelagem de preferência do decisor, assumindo que sua racionalidade de decisão segue adequadamente a teoria da EU.

Em uma perspectiva multiatributo, a elicitação via MAUT/ NSMAUT desempenha um papel importante porque múltiplas perspectivas no funcionamento urbano estão reunidas em um valor de risco único, em termos de utilidades esperadas. Assim, uma ampla gama de informações, que inclui mapeamento de riscos para situações de curto, médio e longo prazo, adoção de medidas estatísticas, gráficas e de desempenho de risco, por exemplo, contribuem para aumentar a percepção de risco do decisor, fundamentando assim a adaptação estratégica das cidades frente a eventos futuros. Adicionalmente, os modelos também podem ajudar o decisor a detectar "potenciais surpresas" quando da ocorrência de eventos desastrosos, mesmo sendo baseados em valores esperados. No entanto, vale a pena reconhecer que, não somente os modelos baseados em MAUT como o novo método, não são excludentes, isto é, uma abordagem não invalida as demais; na verdade, elas são complementares e são particularmente adequadas em contextos específicos para melhorar as decisões no contexto de FRM.

Além disso, o processo decisório com o desenvolvimento de um sistema de apoio a decisão (SAD) apresentado nesta tese explora diversas ferramentas para promover um ambiente de aprendizagem contínuo que permite aos decisores e analistas, antes e depois da aplicação dos modelos, melhorar as técnicas atuais de FRM. Uma análise cíclica (periódica) pode ser encarada como um processo de autoconhecimento, durante o qual novas informações sobre parâmetros e modelagem podem ser atualizadas a fim de melhorar os planos de mitigação, aumentando assim a resiliência desse espaço urbano e mitigando efetivamente os riscos envolvidos. Logo, ao implementar os modelos em um contexto real, este trabalho contribui positivamente para o diagnóstico dos riscos futuros que ameaçam a funcionalidade plena dos espaços urbanos.

## 6.2 Impacto Gerencial e Limitações encontradas

Ambos os modelos foram validados por meio de estudo de caso em uma região da cidade do Recife, capital de Pernambuco, e cujas análises dos resultados podem ser usadas para contextualizar as implicações ambientais, econômicas e sociais desta tese para a sociedade urbana.

Primeiramente, é importante pontuar que os modelos ofereceram suporte ao decisor priorizando alternativas e permitindo, com o uso de índices de controle e monitoramento, que os recursos de gestão sejam gerenciados e alocados de acordo com a criticidade das zonas

urbanas em análise. Em meio a uma realidade de recursos escassos, portanto, este conjunto de informações permite um impacto financeiro considerável, ao estruturar planos de atuação financeira na mitigação de desastres e justificar os investimentos estratégicos da administração pública frente às mudanças climáticas.

Além disso, as abordagens incluem informações ricas, fornecendo visualização gráfica e mapeamento de risco multiatributo. Nesse sentido, quando há necessidade de alocar recursos disponíveis para combate preventivo aos desastres, a abordagem mais adequada é ordenar as ações estratégicas nas diversas alternativas, uma vez que o modelo proposto permite ao decisor compilar um conjunto de informações baseadas em risco que são localizadas nas áreas que compreendem o espaço urbano em estudo.

Os resultados também mostraram que a proposta de modelagem insere uma nova perspectiva às práticas atuais, uma vez que, por exemplo, considera a incerteza nesse processo de decisão, e estima, com um protocolo de Análise de Sensibilidade, informação adicional acerca da robustez da recomendação proferida pelos modelos de decisão. Como consequência, o impacto ambiental dos modelos pode ser percebido a partir da integração dos resultados com os fenômenos climáticos e hidrológicos que incidem sobre o local de estudo, de modo que os órgãos de controle e monitoramento ambiental podem aprimorar suas estratégias de conservação ambiental com os relatórios de decisão providos pelos modelos. Diversos *insights* e evidências de melhoria e adaptação climática no contexto da FRM foram discutidas a fim de reforçar o caráter inovador da pesquisa.

Nesse sentido, a aplicação numérica na região RPA-5 da cidade do Recife foi estendida, então, para validar o novo método. Os resultados demonstraram claramente como a análise da frequência de inundações é aprimorada pela adoção de distribuições de probabilidades dependentes do tempo. Da mesma forma, incorpora, por meio das projeções demográficas dos SSPs, a influência de aspectos sociais utilizadas para estimar as funções consequência que representam os impactos das inundações no sistema urbano. Logo, estratégias de combate a problemas socioeconômicos pela administração pública pode resultar das evidências providas pelo modelo de decisão. Devido ao dinamismo desse problema de decisão particular, o modelo permite uma avaliação aprofundada e integrada dos riscos de inundação, com aspectos sociais, financeiros e ambientais ao longo do tempo, em que as declarações de preferência buscaram modelar a crescente impaciência do decisor em termos de EU, aprimorando a modelagem matemática da subjetividade humana inerente a este processo de tomada de decisão.

Adicionalmente, faz-se necessário comentar sobre os desafios enfrentados para a realização deste trabalho, como: (i) a estruturação de dados estratégicos relativos ao regime pluviométrico e cenários climáticos da região em estudo, cuja acessibilidade e transparência facilitam a aplicação dos modelos propostos; (ii) uma adequada assessoria aos decisores para garantir, a partir de declaração de informação completa entre loterias, um processo de elicitação de preferências coerente com MAUT/ NSMAUT; e (iii) a avaliação da condição de linearidade das preferências do decisor, a fim de balizar o uso factível dos modelos propostos nesta tese.

### 6.3 Sugestões para Trabalhos Futuros

A partir das limitações, evidências científicas e potencialidades dos modelos de decisão estacionários e não estacionário, é possível estabelecer diretrizes relevantes para estudos futuros, a saber:

- os modelos tratam exclusivamente de preferências lineares, quaisquer que sejam as consequências extremas das inundações. Logo, faz-se necessário investigar por meio de estudos experimentais como os modelos com MAUT/NSMAUT podem ser estendidos quando o decisor expressa preferências não lineares em relação aos prospectos (riscos), ajustando assim as possíveis violações da teoria EU;
- os procedimentos para elicitação de preferência em situação de risco foram desenvolvidas de modo que o decisor determinasse o ponto de indiferença a partir de loterias hipotéticas que eram apresentadas. Entretanto, o esforço cognitivo associado a declaração de preferências nessas circunstâncias pode ser reduzido com o desenvolvimento de procedimentos baseados em informação parcial, promovendo, assim, importantes melhorias metodológicas para os métodos MCDM/A baseados em utilidade. Como produto indireto desta tese, uma RSL sobre a abordagem de informação parcial em métodos multicritério de agregação aditiva reforça esta lacuna, especialmente quando as consequências se comportam de forma probabilística (DA SILVA et al., 2022);
- cenários demográficos com SSP se concentram em trajetórias socioeconômicas nacionais com ferramentas recentes nas quais devem estar focados no futuro para melhorar a credibilidade da modelagem não estacionária das consequências das enchentes;

- as mudanças socioeconômicas e climáticas podem inserir novas variáveis para melhorar a análise de risco, como as projeções de uso da terra, o aumento do nível do mar, nível de escoamento da água e outros fatores para que a interação entre importantes índices climáticos possam aprimorar a compreensão e planejamento das dinâmicas regionais de transição urbana e do clima;
- os modelos devem incorporar e gerenciar diferentes quantidade de dados, uma vez que a falta de informação ainda limita a possível modelagem, avaliação e posterior análise dos riscos de inundação. Além disso, a análise sazonal dos riscos de inundação pode ser estendida para inserir novas perspectivas para estratégias de adaptação urbana, bem como a análise de decisão pode ser adaptada para um contexto de decisão em grupo;
- é importante ressaltar que os esforços foram concentrados na concepção do modelo e sua viabilidade por meio da elaboração de um produto tecnológico, o *Flood MATTERS*, de modo que isto permite, a partir de então, o aprimoramento da abordagem de decisão com a aplicação prática dos modelos em diferentes prefeituras brasileiras, de acordo com as suas particularidades;
- estender o processo de tomada de decisão, a partir dos resultados obtidos na análise de risco e sua priorização, a outras problemáticas, como de seleção de portfólio de alternativas de mitigação climática e de classificação de risco com base em perfis pré-definidos (CASADO; ALENCAR; DE ALMEIDA, 2022; VIANA et al., 2021), pode ser um desdobramento útil em estudos de risco para subsidiar informações complementares para guiar o plano de adaptação climática dos grandes centros urbanos.

Desse modo, a partir de novas frentes de trabalho, as contribuições detalhadas extensivamente ao longo desta tese têm o potencial de apoiar outras decisões relacionadas à FRM, como alocações de recursos, logística humanitária, planejamento de sistemas de saúde, localização de abrigos e outras medidas importantes com potencial para alcançar cidades sustentáveis, reduzindo os riscos de inundação.

## REFERÊNCIAS

- ABBASIAN, M.; MOGHIM, S.; ABRISHAMCHI, A. Performance of the general circulation models in simulating temperature and precipitation over Iran. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 135, n. 3–4, p. 1465–1483, 2019.
- ABDELLAOUI, M.; DIECIDUE, E.; ÖNCÜLER, A. Risk Preferences at Different Time Periods: An Experimental Investigation. **Management Science**, v. 57, n. 5, p. 975–987, 2011.
- ABDULLAH, J. et al. Research Trends in Hydrological Modelling. **Jurnal Teknologi**, v. 81, n. 4, p. 1–11, 25 jun. 2019.
- ABEBE, Y.; KABIR, G.; TEFAMARIAM, S. Assessing urban areas vulnerability to pluvial flooding using GIS applications and Bayesian Belief Network model. **Journal of Cleaner Production**, v. 174, p. 1629–1641, 2018.
- AHMADISHARAF, E.; KALYANAPU, A. J.; CHUNG, E. S. Evaluating the Effects of Inundation Duration and Velocity on Selection of Flood Management Alternatives Using Multi-Criteria Decision Making. **Water Resources Management**, v. 29, n. 8, p. 2543–2561, 2015.
- AKTER, T. et al. Impacts of climate and land use changes on flood risk management for the Schijn River, Belgium. **Environmental Science and Policy**, v. 89, n. August, p. 163–175, 2018.
- ALDERMAN, K.; TURNER, L. R.; TONG, S. Floods and human health: A systematic review. **Environment International**, v. 47, p. 37–47, 2012.
- ALENCAR, M. H.; DE ALMEIDA, A. T. A Multicriteria Decision Model for Assessment of Failure Consequences in the RCM Approach. **Mathematical Problems in Engineering**, v. 2015, p. 729865, 2015.
- ALHUMAID, M. et al. Sustainability evaluation framework of urban stormwater drainage options for arid environments using hydraulic modeling and multicriteria decision-making. **Water (Switzerland)**, v. 10, n. 5, 2018.
- ALLAIS, M. Le Comportement de l'Homme Rationnel devant le Risque: Critique des Postulats et Axiomes de l'Ecole Americaine. **Econometrica**, v. 21, p. :503–46., 1953.
- ALVES, A. et al. Multi-criteria Approach for Selection of Green and Grey Infrastructure to Reduce Flood Risk and Increase CO-benefits. **Water Resources Management**, v. 32, n. 7, p. 2505–2522, 2018.
- ANDREONI, J.; SPRENGER, C. Risk Preferences Are Not Time Preferences. **American Economic Review**, v. 102, n. 7, p. 3357–3376, 2012.
- APAC - AGÊNCIA PERNAMBUCANA DE ÁGUAS E CLIMAS. **Monitoramento Pluviométrico do Estado de Pernambuco, Brasil**. Disponível em: <<http://old.apac.pe.gov.br/meteorologia/monitoramento-pluvio.php#>>. Acesso em: 5 jul. 2021.

ARORA, V. K. et al. Carbon emission limits required to satisfy future representative concentration pathways of greenhouse gases. **Geophysical Research Letters**, v. 38, n. 5, 2011.

ASHLEY, R. M. et al. Flooding in the future – predicting climate change, risks and responses in urban areas. **Water Science and Technology**, v. 52, n. 5, p. 265–273, 1 set. 2005.

ATTEMA, A. E. et al. Time-Tradeoff Sequences for Analyzing Discounting and Time Inconsistency. **Management Science**, v. 56, n. 11, p. 2015–2030, 2010.

AVEN, T. On the use of conservatism in risk assessments. **Reliability Engineering and System Safety**, v. 146, p. 33–38, 2016.

AVEN, T. Climate change risk – what is it and how should it be expressed? **Journal of Risk Research**, v. 23, n. 11, p. 1387–1404, 1 nov. 2020.

AVEN, T.; KRISTENSEN, V. How the distinction between general knowledge and specific knowledge can improve the foundation and practice of risk assessment and risk-informed decision-making. **Reliability Engineering & System Safety**, v. 191, p. 106553, 2019.

AVEN, T.; RENN, O. An Evaluation of the Treatment of Risk and Uncertainties in the IPCC Reports on Climate Change. **Risk Analysis**, v. 35, n. 4, p. 701–712, 2015.

AVEN, T.; THEKDI, S. **Risk Science: an Introduction**. 1. ed. London: Routledge, 2021.

BASTOLA, S.; MURPHY, C.; SWEENEY, J. The sensitivity of fluvial flood risk in Irish catchments to the range of IPCC AR4 climate change scenarios. **Science of The Total Environment**, v. 409, n. 24, p. 5403–5415, 2011.

BAUCELLS, M.; HEUKAMP, F. H. Probability and Time Trade-Off. **Management Science**, v. 58, n. 4, p. 831–842, 28 jun. 2012.

BEHESHTIAN, A. et al. Climate-adaptive planning for the long-term resilience of transportation energy infrastructure. **Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review**, v. 113, n. February, p. 99–122, 2018.

BERGER, J. O. **Statistical Decision Theory and Bayesian Analysis**. New York: Springer-Verlag, 1985.

BERRY, M.; BENDOR, T. K. Integrating sea level rise into development suitability analysis. **Computers Environment And Urban Systems**, v. 51, p. 13–24, 2015.

BERTILSSON, L. et al. Urban flood resilience - A multi-criteria index to integrate flood resilience into urban planning. **Journal of Hydrology**, v. 573, p. 970–982, jun. 2019.

BEZGREBELNA, M. et al. Climate change, weather, housing precarity, and homelessness: A systematic review of reviews. **International Journal of Environmental Research and Public Health**, v. 18, n. 11, p. 1–16, 2021.

BIAŁASZEK, W.; MARCOWSKI, P.; COX, D. J. Comparison of multiplicative and additive

hyperbolic and hyperboloid discounting models in delayed lotteries involving gains and losses. **PLoS ONE**, v. 15, n. 5, p. 1–18, 2020.

BRASIL. **Ministério da Integração Nacional, Secretaria Nacional da Defesa Civil. Glossário de Defesa Civil - Estudos de Riscos e Medicina de Desastres**. 5. ed. Brasília: 2009.

BRITO, A. J.; DE ALMEIDA, A. T. Multi-attribute risk assessment for risk ranking of natural gas pipelines. **Reliability Engineering and System Safety**, v. 94, n. 2, p. 187–198, 2009.

BROCKHOFF, R. C.; KOOP, S. H. A.; SNEL, K. A. W. Pluvial Flooding in Utrecht: On Its Way to a Flood-Proof City. **Water**, v. 11, n. 7, jul. 2019.

CABRERA, J. S.; LEE, H. S. Impacts of Climate Change on Flood-Prone Areas in Davao Oriental, Philippines. **Water**, v. 10, n. 7, jul. 2018.

CABRERA, J. S.; LEE, H. S. Flood-Prone Area Assessment Using GIS-Based Multi-Criteria Analysis: A Case Study in Davao Oriental, Philippines. **Water**, v. 11, n. 11, nov. 2019.

CASADO, R. S. G. R.; ALENCAR, M. H.; DE ALMEIDA, A. T. Combining a multidimensional risk evaluation with an implicit enumeration algorithm to tackle the portfolio selection problem of a natural gas pipeline. **Reliability Engineering & System Safety**, v. 221, p. 108332, 2022.

CASTILLO-RODRÍGUEZ, J. T. et al. The value of integrating information from multiple hazards for flood risk analysis and management. **Natural Hazards and Earth System Sciences**, v. 14, n. 2, p. 379–400, 2014.

CHEN, C.-W.; KOUFARIS, M. The impact of decision support system features on user overconfidence and risky behavior. **European Journal of Information Systems**, v. 24, n. 6, p. 607–623, 2015.

CHEN, L.; FRAUENFELD, O. W. Impacts of urbanization on future climate in China. **Climate Dynamics**, v. 47, n. 1, p. 345–357, jul. 2016.

CHEN, N. et al. A Method for Urban Flood Risk Assessment and Zoning Considering Road Environments and Terrain. **Sustainability**, v. 11, n. 10, 2019.

CHITSAZ, N.; BANIHABIB, M. E. Comparison of Different Multi Criteria Decision-Making Models in Prioritizing Flood Management Alternatives. **Water Resources Management**, v. 29, n. 8, p. 2503–2525, 2015.

CHUNG, E.-S.; KIM, Y. Development of fuzzy multi-criteria approach to prioritize locations of treated wastewater use considering climate change scenarios. **Journal of Environmental Management**, v. 146, p. 505–516, 2014.

CLARK, S.; SHARMA, A.; SISSON, S. A. Patterns and comparisons of human-induced changes in river flood impacts in cities. **Hydrology And Earth System Sciences**, v. 22, n. 3, p. 1793–1810, mar. 2018.

COLLINS, W. J. et al. Development and evaluation of an Earth-System model - HadGEM2. **Geoscientific Model Development**, v. 4, n. 4, p. 1051–1075, 2011.

CPTEC/INPE. **PROJETA: Projeções de mudança do clima para a América do Sul regionalizadas pelo modelo ETA**. Disponível em: <<https://projeta.cptec.inpe.br/>>. Acesso em: 4 jun. 2021.

CRED. **Emergency Events Database (EM-DAT)**. Disponível em: <<https://public.emdat.be/>>. Acesso em: 6 abr. 2021.

CUELLAR, A. D.; MCKINNEY, D. C. Decision-making methodology for risk management applied to Imja Lake in Nepal. **Water (Switzerland)**, v. 9, n. 8, p. 14–16, 2017.

DA SILVA, L. B. L. et al. GIS-based multidimensional decision model for enhancing flood risk prioritization in urban areas. **International Journal of Disaster Risk Reduction**, v. 48, 2020.

DA SILVA, L. B. L. et al. A review of partial information in additive multicriteria methods. **IMA Journal of Management Mathematics**, p. 1–37, 13 fev. 2022.

DA SILVA, L. B. L.; ALENCAR, M. H.; DE ALMEIDA, A. T. Multidimensional flood risk management under climate changes: Bibliometric analysis, trends and strategic guidelines for decision-making in urban dynamics. **International Journal of Disaster Risk Reduction**, v. 50, p. 101865, 2020.

DA SILVA, L. B. L.; ALENCAR, M. H.; DE ALMEIDA, A. T. Exploring global sensitivity analysis on a risk-based MCDM/A model to support urban adaptation policies against floods. **International Journal of Disaster Risk Reduction**, 2022a.

DA SILVA, L. B. L.; ALENCAR, M. H.; DE ALMEIDA, A. T. A novel spatiotemporal multi-attribute method for assessing flood risks in urban spaces under climate change and demographic scenarios. **Sustainable Cities and Society**, v. 76, p. 103501, 2022b.

DE ALMEIDA, A. T. et al. **Multicriteria and Multiobjective Models for Risk , Reliability and Maintenance Decision Analysis**. New York: Springer, 2015.

DE ALMEIDA, A. T. et al. A systematic literature review of multicriteria and multi-objective models applied in risk management. **IMA Journal of Management Mathematics**, v. 28, p. 153–184, 27 out. 2017.

DE ALMEIDA, A. T.; DA SILVA, L. B. L.; ALENCAR, M. H. **Flood MATTERS: Decision Support System for Flood Decision Modeling and Analysis Towards Temporal Risk Evaluation in Sustainable Cities**. Recife Software desenvolvido pelos grupos de pesquisa CDSID e REASON (UFPE): Recife, 2022. Disponível em: <[www.reason.org.br/floodmatters](http://www.reason.org.br/floodmatters)>

DE BRITO, M. M.; EVERS, M. Multi-criteria decision-making for flood risk management: a survey of the current state of the art. **Natural Hazards and Earth System Sciences**, v. 16, n. 4, p. 1019–1033, 2016.

EGGIMANN, S. et al. Geospatial simulation of urban neighbourhood densification potentials. **Sustainable Cities and Society**, v. 72, p. 103068, 2021.

EPPLER, M. J.; AESCHIMANN, M. A systematic framework for risk visualization in risk management and communication. **Risk Management An International Journal**, n. 11, p. 67–89, 2009.

FERRETTI, F.; SALTELLI, A.; TARANTOLA, S. Trends in sensitivity analysis practice in the last decade. **Science of The Total Environment**, v. 568, p. 666–670, 2016.

FISHBURN, P. C. Retrospective on the Utility Theory of von Neumann and Morgenstern. **Journal of Risk and Uncertainty**, v. 2, n. 2, p. 127–157, 29 jun. 1989.

FÓRUM ECONÔMICO MUNDIAL. **The Global Risks Report 2021**. Geneva, Switzerland: 2021. Disponível em: <<https://www.weforum.org/reports/the-global-risks-report-2021>>.

FOSTER, J. E.; MCGILLIVRAY, M.; SETH, S. Composite Indices: Rank Robustness, Statistical Association, and Redundancy. **Econometric Reviews**, v. 32, n. 1, p. 35–56, 2013.

FRAME, B. et al. Adapting global shared socio-economic pathways for national and local scenarios. **Climate Risk Management**, v. 21, n. February, p. 39–51, 2018.

FREDERICK, S.; LOEWENSTEIN, G.; O'DONOGHUE, T. Time Discounting and Time Preference: A Critical Review. **Journal of Economic Literature**, v. 40, n. 2, p. 351–401, 2002.

GAUME, E. et al. Bayesian MCMC approach to regional flood frequency analyses involving extraordinary flood events at ungauged sites. **Journal of Hydrology**, v. 394, n. 1–2, p. 101–117, 17 nov. 2010.

GEELS, F. et al. **Perspectives on transitions to sustainability**. EEA Report n 25/2017. Luxembourg: 2018.

GERBER, A.; ROHDE, K. I. M. Eliciting discount functions when baseline consumption changes over time. **Journal of Economic Behavior & Organization**, v. 116, p. 56–64, 2015.

GERBER, A.; ROHDE, K. I. M. Weighted temporal utility. **Economic Theory**, v. 66, n. 1, p. 187–212, 2018.

GONDO, T. A hierarchical cluster based segmentation analysis of potential solid waste management health hazards in urban Ethiopia. **JAMBA-Journal Of Disaster Risk Studies**, v. 11, jul. 2019.

GRAFF, K. et al. Analysis and quantification of potential consequences in multirisk coastal context at different spatial scales (Normandy, France). **Natural Hazards**, v. 99, n. 2, p. 637–664, nov. 2019.

GREEN, C. H.; PARKER, D. J.; TUNSTALL, S. M. Assessment of flood control and management options. WCD Thematic reviews. World Commission on Dams. n. WCD Thematic reviews. World Commission on Dams Secretariat, South Africa. Vancouver, p. 165,

2000.

HAIDER, H. et al. Sustainability Evaluation of Rainwater Harvesting-Based Flood Risk Management Strategies: A Multilevel Decision-Making Framework for Arid Environments. **Arabian Journal For Science And Engineering**, v. 44, n. 10, p. 8465–8488, 2019.

HAN, J.; HE, S. Urban flooding events pose risks of virus spread during the novel coronavirus (COVID-19) pandemic. **Science of The Total Environment**, v. 755, p. 142491, 2021.

HAQUE, A. N. Application of Multi-Criteria Analysis on Climate Adaptation Assessment in the Context of Least Developed Countries. **Journal of Multi-Criteria Decision Analysis**, v. 23, n. 5–6, p. 210–224, 2016.

HATEGEKIMANA, Y. et al. Integration of multi-parametric fuzzy analytic hierarchy process and GIS along the UNESCO World Heritage: a flood hazard index, Mombasa County, Kenya. **Natural Hazards**, v. 92, n. 2, p. 1137–1153, jun. 2018.

HELD, D.; ROGER, C. Three Models of Global Climate Governance: From Kyoto to Paris and Beyond. **Global Policy**, v. 9, n. 4, p. 527–537, 2018.

HEWITT, R. J. et al. Beyond shared socioeconomic pathways (SSPs) and representative concentration pathways (RCPs): climate policy implementation scenarios for Europe, the US and China. **Climate Policy**, v. 21, n. 4, p. 434–454, 2021.

HODGKINS, G. A. et al. Effects of climate, regulation, and urbanization on historical flood trends in the United States. **Journal of Hydrology**, v. 573, n. August 2018, p. 697–709, 2019.

HOYMANN, J.; GOETZKE, R. Simulation and Evaluation of Urban Growth for Germany Including Climate Change Mitigation and Adaptation Measures. **ISPRS International Journal Of Geo-Information**, v. 5, n. 7, jul. 2016.

HSU, T.-W. et al. A Study on Coastal Flooding and Risk Assessment under Climate Change in the Mid-Western Coast of Taiwan. **Water**, v. 9, n. 6, jun. 2017.

ICLEI - INTERNATIONAL COUNCIL FOR LOCAL ENVIRONMENTAL INITIATIVES. **Plano Local de Ação Climática do Recife – Projeto Urban-LEDS II: Acelerando a Ação Climática por meio da Promoção de Estratégias de Desenvolvimento de Baixo Carbono**. São Paulo, Brazil: 2019.

IPCC. **Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. 1. ed. Geneva, Switzerland: Cambridge University Press, 2021.

JUN, K.-S. et al. A fuzzy multi-criteria approach to flood risk vulnerability in South Korea by considering climate change impacts. **Expert Systems with Applications**, v. 40, n. 4, p. 1003–1013, 2013.

JUN, K. S. et al. Development of spatial water resources vulnerability index considering climate change impacts. **Science of the Total Environment**, v. 409, n. 24, p. 5228–5242,

nov. 2011.

KADDOURA, K.; ZAYED, T.; HAWARI, A. H. Multiattribute Utility Theory Deployment in Sewer Defects Assessment. **Journal of Computing in Civil Engineering**, v. 32, n. 2, p. 4017074, 1 mar. 2018.

KARAMOUZ, M. et al. Prioritizing Investments in Improving Flood Resilience and Reliability of Wastewater Treatment Infrastructure. **Journal of Infrastructure Systems**, v. 24, n. 4, p. 04018021, 2018.

KEENAN, J. M. Adaptive capacity of commercial real estate firms in New York City to urban flooding. **Journal of Water and Climate Change**, v. 6, n. 3, p. 486–500, 2015.

KEENEY, R. L.; RAIFFA, H. **Decision with Multiple Objectives: Preferences and Value Trade-Offs**. John Wiley & Sons, 1976.

KIND, J.; WOUTER BOTZEN, W. J.; AERTS, J. C. J. H. Accounting for risk aversion, income distribution and social welfare in cost-benefit analysis for flood risk management. **Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change**, v. 8, n. 2, p. 1–20, 2017.

KIRSHEN, P. et al. Adapting Urban Infrastructure to Climate Change: A Drainage Case Study. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v. 141, n. 4, 2015.

KITCHENHAM, B. et al. Systematic literature reviews in software engineering - A systematic literature review. **Information and Software Technology**, v. 51, n. 1, p. 7–15, 2009.

KOTZEE, I.; REYERS, B. Piloting a social-ecological index for measuring flood resilience: A composite index approach. **Ecological Indicators**, v. 60, p. 45–53, jan. 2016.

KOURGIALAS, N. N.; KARATZAS, G. P. A flood risk decision making approach for Mediterranean tree crops using GIS; climate change effects and flood-tolerant species. **Environmental Science & Policy**, v. 63, p. 132–142, 2016.

KOURGIALAS, N. N.; KARATZAS, G. P. A national scale flood hazard mapping methodology: The case of Greece - Protection and adaptation policy approaches. **Science of The Total Environment**, v. 601, p. 441–452, 2017.

KUILEN, G. VAN DE; WAKKER, P. P. The Midweight Method to Measure Attitudes Toward Risk and Ambiguity The Midweight Method to Measure Attitudes Toward Risk and Ambiguity. n. September 2016, 2011.

LAWRENCE, D. et al. Stochastic semi-continuous simulation for extreme flood estimation in catchments with combined rainfall-snowmelt flood regimes. **Natural Hazards and Earth System Sciences Discussions**, v. 1, p. 6785–6828, 2013.

LILAI, X. et al. A multi-dimensional integrated approach to assess flood risks on a coastal city, induced by sea-level rise and storm tides. **ENVIRONMENTAL RESEARCH LETTERS**, v. 11, n. 1, jan. 2016.

- LIU, L. et al. Sustainability-Informed Bridge Ranking under Scour Based on Transportation Network Performance and Multiattribute Utility. **Journal of Bridge Engineering**, v. 23, n. 10, p. 1–12, 2018a.
- LIU, W. et al. Sensitivity analysis of structural health risk in operational tunnels. **Automation in Construction**, v. 94, p. 135–153, 2018b.
- LOGAN, T. M. et al. The Role of Time in Risk and Risk Analysis: Implications for Resilience, Sustainability, and Management. **Risk analysis : an official publication of the Society for Risk Analysis**, v. 41, n. 11, p. 1959–1970, nov. 2021.
- LOOS, J. R.; ROGERS, S. H. Understanding stakeholder preferences for flood adaptation alternatives with natural capital implications. **Ecology and Society**, v. 21, n. 3, 2016.
- MADONSELA, B. et al. Evaluation of Water Governance Processes Required to Transition towards Water Sensitive Urban Design An Indicator Assessment Approach for the City of Cape Town. **WATER**, v. 11, n. 2, 2019.
- MEDEIROS, C. P. et al. A new method for managing multidimensional risks in Natural Gas Pipelines based on non-Expected Utility. **Reliability Engineering & System Safety**, v. 214, p. 107709, 2021.
- MEDEIROS, C. P.; ALENCAR, M. H.; DE ALMEIDA, A. T. Hydrogen pipelines: Enhancing information visualization and statistical tests for global sensitivity analysis when evaluating multidimensional risks to support decision-making. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 41, n. 47, p. 22192–22205, 2016.
- MEDEIROS, C. P.; ALENCAR, M. H.; DE ALMEIDA, A. T. Multidimensional risk evaluation of natural gas pipelines based on a multicriteria decision model using visualization tools and statistical tests for global sensitivity analysis. **Reliability Engineering & System Safety**, v. 165, n. March, p. 268–276, 2017.
- MEJIA-ARGUETA, C. et al. Multicriteria optimization approach to deploy humanitarian logistic operations integrally during floods. **International Transactions in Operational Research**, v. 25, n. 3, p. 1053–1079, 2018.
- MEYER, V.; SCHEUER, S.; HAASE, D. A multicriteria approach for flood risk mapping exemplified at the Mulde river, Germany. **Natural Hazards**, v. 48, n. 1, p. 17–39, 2009.
- MIGUEZ, M. G.; GREGORIO, L. T. DI; VEROL, A. P. **Gestão de riscos e desastres hidrológicos**. 1. ed. Rio de Janeiro, RJ: Elsevier, 2018.
- MUELLER, A. Flood risks in a dynamic urban agglomeration: a conceptual and methodological assessment framework. **NATURAL HAZARDS**, v. 65, n. 3, p. 1931–1950, 2013.
- MUNICH RE. **NatCatService**. Disponível em: <<http://natcatservice.munichre.com/>>. Acesso em: 30 nov. 2021.
- MUNICÍPIO DO RECIFE. **Análise de riscos e vulnerabilidades climáticas e estratégia de**

**adaptação do município do Recife – PE: resumo para tomadores de decisão.** Disponível em: <[http://www2.recife.pe.gov.br/sites/default/files/sumario\\_clima\\_recife\\_portugues.pdf](http://www2.recife.pe.gov.br/sites/default/files/sumario_clima_recife_portugues.pdf)>. Acesso em: 7 maio. 2021.

NOBRE, P. et al. Climate Simulation and Change in the Brazilian Climate Model. **Journal of Climate**, v. 26, n. 17, p. 6716–6732, 2013.

O'DONNELL, E. C.; THORNE, C. R. Drivers of future urban flood risk. **Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences**, v. 378, n. 2168, 2020.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. **World Urbanization Prospects: The 2018 Revision**. New York: 2018.

ORGANIZAÇÃO MUNDIAL DA SAÚDE. **COP26 Special Report on Climate Change and Health: the Health Argument for Climate Action**. Geneva, Switzerland: Organização Mundial da Saúde, 2021.

OUARDA, T. B. M. J.; CHARRON, C. Changes in the distribution of hydro-climatic extremes in a non-stationary framework. **Scientific Reports**, v. 9, n. 1, p. 1–8, 2019.

PATRA, J. P.; KUMAR, R.; MANI, P. Combined Fluvial and Pluvial Flood Inundation Modelling for a Project Site. **Procedia Technology**, v. 24, p. 93–100, 2016.

POUR, S. H. et al. Low impact development techniques to mitigate the impacts of climate-change-induced urban floods: Current trends, issues and challenges. **Sustainable Cities and Society**, v. 62, p. 102373, 2020.

PÖYHÖNEN, M.; HÄMÄLÄINEN, R. P. Notes on the weighting biases in value trees. **Journal of Behavioral Decision Making**, v. 11, n. 2, p. 139–150, 1998.

PÖYHÖNEN, M.; VROLIJK, H.; HÄMÄLÄINEN, R. P. Behavioral and procedural consequences of structural variation in value trees. **European Journal of Operational Research**, v. 134, n. 1, p. 216–227, 2001.

PREGNOLATO, M. et al. The impact of flooding on road transport: A depth-disruption function. **Transportation Research Part D: Transport and Environment**, v. 55, p. 67–81, 2017.

PRELEC, D.; LOEWENSTEIN, G. Decision Making Over Time and Under Uncertainty: A Common Approach. **Management Science**, v. 37, n. 7, p. 770–786, 1991.

PRIORI, L.; ALENCAR, M. H.; DE ALMEIDA, A. T. 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, 2017. p. 145–157.

PUTH, M.-T.; NEUHÄUSER, M.; RUXTON, G. D. Effective use of Spearman's and Kendall's correlation coefficients for association between two measured traits. **Animal Behaviour**, v. 102, p. 77–84, 2015.

RAMBAUD, S. C.; FERNÁNDEZ, I. G. A measure of inconsistencies in intertemporal choice. **PLOS ONE**, v. 14, n. 10, p. 1–24, 2019.

RAMBAUD, S. C.; PÉREZ, A. M. S. Discounted and expected utility from the probability and time trade-off model. **Mathematics**, v. 8, n. 4, 2020.

REY, T. et al. An integrative approach to understand vulnerability and resilience post-disaster The 2015 cyclone Pam in urban Vanuatu as case study. **Disaster Prevention And Management**, v. 26, n. 3, p. 259–275, 2017.

REYNAUD, A.; AUBERT, C. **Does flood experience modify risk preferences? Evidence from an artefactual field experiment in Vietnam**. Palgrave Macmillan UK, 2020. v. 45

RIAHI, K. et al. The Shared Socioeconomic Pathways and their energy, land use, and greenhouse gas emissions implications: An overview. **Global Environmental Change**, v. 42, p. 153–168, 2017.

RIZEEI, H. M.; PRADHAN, B.; SAHARKHIZ, M. A. Allocation of emergency response centres in response to pluvial flooding-prone demand points using integrated multiple layer perceptron and maximum coverage location problem models. **International Journal of Disaster Risk Reduction**, v. 38, n. June, p. 101205, 2019.

ROBINSON, P. J.; BOTZEN, W. J. W. Determinants of Probability Neglect and Risk Attitudes for Disaster Risk: An Online Experimental Study of Flood Insurance Demand among Homeowners. **Risk Analysis**, v. 39, n. 11, p. 2514–2527, 2019.

SALTELLI, A. et al. Sensitivity Analysis: From Theory to Practice. In: SALTELLI, A. et al. (Eds.). **Global Sensitivity Analysis: the Primer**. John Wiley & Sons, Ltd, 2008. p. 237–275.

SALTELLI, A. et al. Why so many published sensitivity analyses are false: A systematic review of sensitivity analysis practices. **Environmental Modelling & Software**, v. 114, p. 29–39, 2019.

SAMUELS, P.; GOULDBY, B. **Language of Risk – Project definitions**. Floodsite, 2012.

SEPEHRI, M. et al. Assessment of check dams' role in flood hazard mapping in a semi-arid environment. **Geomatics Natural Hazards & Risk**, v. 10, n. 1, p. 2239–2256, jan. 2019.

SERINALDI, F.; KILSBY, C. G. Rainfall extremes: Toward reconciliation after the battle of distributions. **Water Resources Research**, v. 50, n. 1, p. 336–352, 2014.

SERINALDI, F.; KILSBY, C. G. Stationarity is undead: Uncertainty dominates the distribution of extremes. **Advances in Water Resources**, v. 77, p. 17–36, 2015.

SONG, J. Y.; CHUNG, E.-S. Robustness, Uncertainty and Sensitivity Analyses of the TOPSIS Method for Quantitative Climate Change Vulnerability: a Case Study of Flood Damage. **Water Resources Management**, v. 30, n. 13, p. 4751–4771, 2016.

SOWMYA, K.; JOHN, C. M.; SHRIVASTHAVA, N. K. Urban flood vulnerability zoning of Cochin City, southwest coast of India, using remote sensing and GIS. **Natural Hazards**, v.

75, n. 2, p. 1271–1286, jan. 2015.

ŠRAJ, M. et al. The influence of non-stationarity in extreme hydrological events on flood frequency estimation. **Journal of Hydrology and Hydromechanics**, v. 64, n. 4, p. 426–437, 2016.

STIPANOVIC, I. et al. A Multiobjective Decision-Making Model for Risk-Based Maintenance Scheduling of Railway Earthworks. **Applied Sciences**, v. 11, n. 3, p. 965, 21 jan. 2021.

TAHERI, E.; WANG, C. Eliciting Public Risk Preferences in Emergency Situations. **Decision Analysis**, v. 15, n. 4, p. 223–241, 2018.

TAKAHASHI, T.; OONO, H.; RADFORD, M. H. B. Psychophysics of time perception and intertemporal choice models. **Physica A: Statistical Mechanics and its Applications**, v. 387, n. 8, p. 2066–2074, 2008.

TORRESAN, S. et al. DESYCO: A decision support system for the regional risk assessment of climate change impacts in coastal zones. **Ocean & Coastal Management**, v. 120, p. 49–63, 2016.

VIANA, F. F. C. L. et al. Multidimensional risk classification with global sensitivity analysis to support planning operations in a transportation network of natural gas pipelines. **Journal of Natural Gas Science and Engineering**, p. 104318, 2021.

VIGUIE, V.; HALLEGATTE, S. Trade-offs and synergies in urban climate policies. **Nature Climate Change**, v. 2, n. 5, p. 334–337, 2012.

WAKKER, P. **Prospect Theory For Risk and Ambiguity**. Cambridge University Press, 2010.

WANG, X.; ZHOU, J.; ZHANG, L. The probability density evolution method for flood frequency analysis: A case study of the nen river in China. **Water (Switzerland)**, v. 7, n. 9, p. 5134–5151, 2015.

WATANABE, M. et al. Improved Climate Simulation by MIROC5: Mean States, Variability, and Climate Sensitivity. **Journal of Climate**, v. 23, n. 23, p. 6312–6335, 2010.

WATANABE, T.; TESKE, S. S.; HAAS, C. N. Classic dose-response and time postinoculation models for *Leptospira*. **Risk Analysis**, v. 34, n. 3, p. 465–484, 2014.

WEAR, D. N.; PRESTEMON, J. P. Spatiotemporal downscaling of global population and income scenarios for the United States. **PLoS ONE**, v. 14, n. 7, p. 1–19, 2019.

WOETZEL, J. et al. **Climate risk and response Physical hazards and socioeconomic impacts**. McKinsey Global Institute, 2020.

WU, Z. et al. Depth prediction of urban flood under different rainfall return periods based on deep learning and data warehouse. **Science of The Total Environment**, v. 716, p. 137077, 2020.

XING, Y. et al. Investigation of the importance of different factors of flood inundation modeling applied in urbanized area with variance-based global sensitivity analysis. **Science of The Total Environment**, v. 772, p. 145327, 2021.

YANG, S.; CUI, X. Building regional sustainable development scenarios with the SSP framework. **Sustainability (Switzerland)**, v. 11, n. 20, p. 1–13, 2019.

YOUNG, A. F.; JORGE PAPINI, J. A. How can scenarios on flood disaster risk support urban response? A case study in Campinas Metropolitan Area (São Paulo, Brazil). **Sustainable Cities and Society**, v. 61, p. 102253, 2020.

ZAUBERMAN, G. et al. Discounting Time and Time Discounting: Subjective Time Perception and Intertemporal Preferences. **Journal of Marketing Research**, v. 46, n. 4, p. 543–556, 29 jun. 2009.

ZHANG, L.; SINGH, V. P. Frequency Analysis of Flood Damage. **Journal of Hydrologic Engineering**, v. 10, n. 2, p. 100–109, 2005.

ZHOU, L. et al. Multi-scenario simulation of urban land change in Shanghai by random forest and CA-Markov model. **Sustainable Cities and Society**, v. 55, p. 102045, 2020.

ZIO, E. The future of risk assessment. **Reliability Engineering & System Safety**, v. 177, p. 176–190, 2018.

## APÊNDICE A – NOTAÇÕES MATEMÁTICAS

A lista abaixo detalha a nomenclatura usada nos capítulos 3 e 4 a fim de proporcionar aos leitores um melhor entendimento acerca dos modelos propostos nesta tese.

Notação	Descrição
$\theta_j$	Estado da Natureza, para $j = 1$ (cenário de controle e monitoramento), 2 (cenário de alerta/ vigilância) e 3 (cenário de crise/ calamidade pública);
$[x, p, t]$	Prospecto com a probabilidade $p$ de receber uma consequência $x$ no tempo $t$ ;
$t_d$	Instante (ou tempo) de decisão;
$t_c$	Instante (ou tempo) de consumo (das consequências);
$t_r$	Instante (ou tempo) de resolução (da incerteza associada);
$atr$	atributo (ou critério) nos modelos: Ambiental/ sanitário ( <i>amb</i> ), financeiro ( <i>fin</i> ), humano ( <i>hum</i> ), de mobilidade ( <i>mob</i> ), e social ( <i>soc</i> );
$p$	Probabilidade de ocorrência;
$W(p)$	Função ponderação;
$a_i$	Zona urbana (alternativa);
$N$	Número de alternativas;
$A$	Conjunto de alternativas;
$x_w$	Pior consequência no atributo <i>atr</i> ;
$x^*$	Melhor consequência no atributo <i>atr</i> ;
$X$	Conjunto de <i>payoffs</i> (consequências);
$y_j$	Registro de precipitação medida no instante $j$ ;
$\hat{y}_j$	Registro de precipitação projetada no instante $j$ ;
$EMA_t$	Erro médio absoluto até o instante $t$ ;
$REMQ_t$	Raiz do erro médio quadrático até o instante $t$ ;
$\pi_\theta$	Probabilidade a priori não-estacionária, em função do tempo $t$ ;
$\pi(\theta, t)$	Probabilidade a priori não-estacionária, em função do tempo $t$ ;
$GEV(\mu, \sigma, \xi)$	Parâmetros de localização, forma e escala da distribuição GEV, respectivamente;
$a, b, c$	Parâmetros da função polinomial de $\mu(t)$ e $\sigma(t)$ ;
$f_{atr}(x \theta, a_i)$	Função consequência estacionária quanto $\theta$ ocorre em uma zona $a_i$ , considerando o atributo <i>atr</i> ;

$f_{atr}(x \theta, a_i, t)$	Função consequência não-estacionária quanto $\theta$ ocorre em uma zona $a_i$ , considerando o atributo $atr$ no instante $t$ ;
$u_{atr}(x \theta)$	Função utilidade estacionária para o atributo $atr$ ;
$u_{atr}(x \theta, t)$	Função utilidade não-estacionária para o atributo $atr$ ;
$r_x$	Taxa de desconto em função da magnitude de consequência $x$ ;
$k_{atr}$	Constante de escala para o atributo $atr$ ;
$L_{atr}(\theta_j, a_i)$	Função perda da zona $a_i$ no atributo $atr$ , dado que o cenário $\theta_j$ ocorreu;
$r_{a_i}^{atr}$	Risco de inundação relativo ao atributo $atr$ para a zona $a_i$ ;
$r_{a_i,t}^{atr}$	Risco de inundação relativo ao atributo $atr$ para a zona $a_i$ no instante $t$ ;
$r_{a_i}^{global}$	Risco global de inundação para a zona $a_i$ ;
$r_{a_i,t}^{global}$	Risco global de inundação para a zona $a_i$ no instante $t$ ;
$\bar{r}_{a_i,\Delta t}^{global}$	Risco global médio de inundação para a zona $a_i$ durante o intervalo de tempo $\Delta t$ ;
$r_{a_i z}^{global}$	Risco global de inundação para a zona $a_i$ que ocupa a $z$ -ésima posição no <i>ranking</i> ;
$r_{a_i,t z}^{global}$	Risco global de inundação para a zona $a_i$ no instante $t$ que ocupa a $z$ -ésima posição no <i>ranking</i> ;
$\frac{\partial r_{a_i,t}^{global}}{\partial t}$	Gradiente de risco global para uma zona $a_i$ no instante $t$ ;
$IMR_{a_i z}$	Índice de magnitude relativa para uma zona $a_i$ no atributo $atr$ que ocupa a $z$ -ésima posição no <i>ranking</i> ;
$IMR_{a_i,t z}$	Índice de magnitude relativa para uma zona $a_i$ no atributo $atr$ e instante $t$ que ocupa a $z$ -ésima posição no <i>ranking</i> ;
$L(\mu(t), \sigma(t), \xi)$	Função de verossimilhança para a distribuição GEV;
$\ell(\hat{y}_j, \mu(t), \sigma(t), \xi)$	Função logaritmo de verossimilhança para a distribuição GEV.