

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS**  
**INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS – IGC**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ANÁLISE E MODELAGEM DE**  
**SISTEMAS AMBIENTAIS**

**GABRIELA FREITAS AVELINO**

**COMPARAÇÃO DE MODELOS DE ANÁLISE MULTICRITÉRIO PARA**  
**DETERMINAÇÃO DE VULNERABILIDADE FUTURA À INUNDAÇÃO EM NOVA**  
**LIMA/MG**

Belo Horizonte

2024

Gabriela Freitas Avelino

**COMPARAÇÃO DE MODELOS DE ANÁLISE MULTICRITÉRIO PARA  
DETERMINAÇÃO DE VULNERABILIDADE FUTURA À INUNDAÇÃO EM NOVA  
LIMA/MG**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Análise e Modelagem de Sistemas Ambientais da Universidade Federal de Minas Gerais como requisito para obtenção do título de mestre em Análise e Modelagem de Sistemas Ambientais.

Orientador: Prof. Dr. Ricardo Alexandrino Garcia

Belo Horizonte

2024

A948c  
2024

Avelino, Gabriela Freitas.

Comparação de modelos de análise multicritério para determinação de vulnerabilidade futura à inundação em Nova Lima/MG [manuscrito] / Gabriela Freitas Avelino. – 2024.

102 f., enc. il. (principalmente color.)

Orientador: Ricardo Alexandrino Garcia.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Minas Gerais, Instituto de Geociências, 2024.

Bibliografia: f. 91-99.

Inclui apêndice.

1. Modelagem de dados – Aspectos ambientais – Teses. 2. Solos – Inundação – Teses. 3. Processo decisório por critério múltiplo – Teses. 4. Análise fatorial – Teses. 5. Sistemas de informação geográfica – Teses. 6. Mudanças climáticas – Teses. I. Garcia, Ricardo Alexandrino. II. Universidade Federal de Minas Gerais. Instituto de Geociências. III. Título.

CDU: 911.2:519.6(815.1)



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS  
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ANÁLISE E MODELAGEM DE SISTEMAS AMBIENTAIS

## FOLHA DE APROVAÇÃO

**"Comparação de modelos de análise multicritério para determinação de vulnerabilidade futura à inundação em Nova Lima/MG"**

**Gabriela Freitas Avelino**

Dissertação de Mestrado defendida e aprovada, no dia **16 de agosto de 2024**, pela Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Análise e Modelagem de Sistemas Ambientais da Universidade Federal de Minas Gerais constituída pelos seguintes professores:

**Ricardo Alexandrino Garcia - Orientador**

Universidade Federal de Minas Gerais

**Marcelo Antônio Nero**

Universidade Federal de Minas Gerais

**Tiago Cisalpino Pinheiro**

Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais

Belo Horizonte, 02 de setembro de 2024.



Documento assinado eletronicamente por **Marcelo Antonio Nero, Professor do Magistério Superior**, em 02/09/2024, às 09:30, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Tiago Cisalpino Pinheiro, Usuário Externo**, em 02/09/2024, às 10:53, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).

Documento assinado eletronicamente por **Ricardo Alexandrino Garcia, Professor do**



**Magistério Superior**, em 02/09/2024, às 10:58, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site [https://sei.ufmg.br/sei/controlador\\_externo.php?acao=documento\\_conferir&id\\_orgao\\_acesso\\_externo=0](https://sei.ufmg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **3512313** e o código CRC **F0D39D21**.

Referência: Processo nº 23072.249615/2024-70

SEI nº 3512313

*Dedico esse trabalho aos meus pais que muito trabalharam no sol, para que eu pudesse viver assim, na sombra.*

*Também dedico à todas as mulheres fortes que me cercam. Nada seria possível sem o apoio, incentivo e inspiração de vocês.*

*Ao Gabriel e aos nossos sonhos.*

## AGRADECIMENTOS

A felicidade só é real quando compartilhada, ou sonho que se sonha junto se torna realidade, ou mais ainda, se consegui ver mais longe é porque estava sobre os ombros de gigantes. Eu acredito, de maneira fiel, de que pouco conseguimos sozinhos, ainda que tenha essa dificuldade em pedir ajuda. Nesse momento, gostaria de agradecer a todos e todas que contribuíram, sonharam, compartilharam para a materialidade desse projeto. Numa perspectiva acadêmica, gostaria de agradecer aos professores Ricardo Alexandrino e André Naime, pela orientação durante esse processo. Orientação não só técnico-científica, mas também na jornada acadêmica, acolhendo e respeitando meus momentos de insegurança, a falta de tempo da dupla jornada trabalho-mestrado. Sinto que sou uma profissional muito mais qualificada e atribuo isso às contribuições, conselhos, conversas que tivemos. Agradeço também ao grande número de profissionais e amigos que me auxiliaram nesse caminho. Ao grupo “Conselhos de Geógrafos para a minha dissertação” onde eu sempre recorri quando esqueci o nome de uma ferramenta ou quando senti que estava fugindo da geografia nas minhas análises. Por fim, vem o agradecimento às coisas imateriais, as conversas de apoio, os incentivos, os abraços acolhedores, a paciência cotidiana e as pequenas comemorações. Gostaria de expressar minha profunda gratidão ao Gabriel, cuja presença nos bastidores foi essencial para a conclusão deste trabalho. Muitas vezes, o apoio silencioso e constante que recebemos é subestimado, mas a verdade é que sem ele, nossos objetivos seriam muito mais difíceis de alcançar. Agradeço imensamente por suas palavras de incentivo e, principalmente, por ter assumido tantas responsabilidades para que eu pudesse me dedicar aos meus estudos. Seu apoio incondicional, disposição para segurar as pontas e sua capacidade de encontrar soluções em momentos desafiadores foram fundamentais para que este trabalho se tornasse realidade. Sem seu suporte, esta conquista não teria sido possível. Esse trabalho é dedicado às mulheres fortes da minha vida e aqui consigo colocar seus nomes e agradecê-las por coisas que me ofereceram que não são nem possíveis de nominar: Hilda, Denise, Maria do Carmo, Letícia, Bárbara, Aline, Jéssica, Isabelle, Janini, Débora, Rosa, Thaís.

## RESUMO

O presente estudo visa contribuir para o estabelecimento de uma metodologia para o mapeamento de áreas vulneráveis ao risco climático projetado à inundação, utilizando como estudo de caso Nova Lima, MG, no período de 2021 a 2040. Para tanto foi aplicada análise multicritério, foram comparadas duas abordagens para a definição de pesos: um método subjetivo, baseado em conhecimentos de especialistas, e um método objetivo, utilizando a análise fatorial por componentes principais. As variáveis consideradas foram uso e cobertura do solo (MapBiomass, 2022), fluxo acumulado, declividade, hipsometria e precipitação projetada pelo modelo MPI-ESM1.2-HR. Em ambiente SIG (Sistemas de Informação Geográfica), as variáveis foram processadas e os mapas de vulnerabilidade criados através de álgebra de mapas. A acurácia dos mapas de vulnerabilidade resultantes foi avaliada com base em dados históricos de inundações. Considerando o conjunto de dados utilizado nesse estudo, o modelo elaborado com base no conhecimento de especialistas mostrou-se mais acurado, tendo um Índice Crítico de Sucesso de 94,7%, enquanto o modelo objetivo teve Índice Crítico de Sucesso de 21,1%. Algumas regiões da cidade com histórico de inundação como a sede municipal e o bairro de Honório Bicalho são identificadas com áreas de alta e muito alta vulnerabilidade projetada para o período 2021-2040. Contudo, algumas áreas identificadas como maior vulnerabilidade são surpreendentes, o que é o caso da região do Bairro Jardim Canadá e Condomínio Morro do Chapéu. Atribuiu-se a isso a influência da espacialização da precipitação nos dois modelos. Pela identificação das áreas com maior vulnerabilidade, o estudo contribui para o planejamento urbano e a elaboração de medidas de mitigação e adaptação às mudanças climáticas em Nova Lima. Entende-se que a partir da espacialização do perigo à inundação aqui apresentado, esse trabalho forneça bases para a elaboração de estudos de risco climático mais complexos.

Palavras-chave: vulnerabilidade; inundação; análise multicritério; análise fatorial; sig, mudanças climáticas.

## ABSTRACT

The present study aims to contribute to the establishment of a methodology for mapping areas vulnerable to projected climate risk of flooding, using Nova Lima, MG as a case study, for the period 2021 to 2040. Using multicriteria analysis, two approaches for defining weights were compared: a subjective method, based on expert knowledge, and an objective method, using principal component analysis. The variables considered were land use and cover (MapBiomass, 2022), accumulated flow, slope, hypsometry, and precipitation projected by the MPI-ESM1.2-HR model. In a GIS environment, the variables were processed, and vulnerability maps were created through map algebra. The accuracy of the resulting vulnerability maps was evaluated based on historical flood data. Considering the data set used in this study, the model based on expert knowledge proved to be more accurate, with a Critical Success Index of 94.7%, while the objective model had a Critical Success Index of 21.1%. Some areas of the city with a history of flooding, such as the municipal headquarters and the Honório Bicalho neighborhood, are identified as areas of high and very high projected vulnerability for the period 2021-2040. However, some areas identified as having higher vulnerability are surprising, such as the Jardim Canadá neighborhood and the Morro do Chapéu Condominium. This is attributed to the influence of precipitation spatialization in both models. By identifying the areas with the greatest vulnerability, the study contributes to urban planning and the development of mitigation and adaptation measures to climate change in Nova Lima. It is understood that from the spatialization of flood hazard presented here, this work provides a basis for the development of more complex climate risk studies.

Keywords: vulnerability; flooding; multicriteria analysis; factor analysis; gis; climate change.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 Ilustração da relação entre os componentes do risco climático: Vulnerabilidade, perigo e exposição..	19
Quadro 1 Descrição e relação entre cenários (RCP) e Caminhos modelados considerados no AR-6. Os valores preenchidos com NA não possuem correlação entre cenários.....	28
Mapa 1 Mapa de localização do município de Nova Lima. ....	32
Mapa 2 Mapa de Hidrografia.....	34
Mapa 3 Mapa de Hipsometria. ....	36
Mapa 4 Mapa de declividade.....	37
Mapa 5 Mapa de uso do solo.....	39
Figura 2 Modelagem do fluxo acumulado.....	44
Figura 3 Detalhe do fluxo acumulado em Nova Lima. ....	45
Quadro 2 Suscetibilidade à inundação das classes de uso do solo. ....	47
Figura 4 Variáveis normalizadas e pós etapa de processamento de imagens.....	49
Quadro 3 Suscetibilidade à inundação das classes de uso do solo. ....	52
Figura 5 Escores calculados via análise fatorial por componente principal.....	55
Figura 6 Fluxograma do processo metodológico.. ....	56
Quadro 4 Pontos conhecidos de inundação em Nova Lima. ....	58
Mapa 6 Pontos conhecidos com histórico de inundação em Nova Lima. ....	60
Figura 7 Saída do software SPSS com o resultado do teste t pareado. ....	64
Figura 8 Precipitação média mensal projetada para o período de 2021 a 2024. ....	65
Mapa 7 Mapa de Vulnerabilidade à inundação AMC-E. ....	66
Quadro 5 Pesos atribuídos às variáveis no modelo AMC-E. ....	67
Quadro 6 Área em hectares ocupada pelas classes de vulnerabilidade no modelo AMC-E. ...	68
Figura 9 I de Moran para AMC-E. Fonte: Elaborado pela autora, 2024.....	70
Figura 10 Cartograma de agrupamento LISA para AMC-E.....	71
Figura 11 Cartograma de significância LISA para AMC-E.....	72
Mapa 8 Mapa de Vulnerabilidade à inundação AMC-ACP,.....	73
Quadro 7 Pesos atribuídos às variáveis no modelo AMC-ACP. ....	74
Figura 12 Histograma do modelo AMC-ACP.....	75
Quadro 8 Área em hectares ocupada pelas classes de vulnerabilidade no modelo AMC-ACP. .....	75
Figura 13 I de Moran do modelo AMC-ACP. Fonte:.....	76

Figura 14 Cartograma de agrupamento LISA para AMC-ACP .....	77
Figura 15 Cartograma de Significância do modelo AMC-ACP.....	78
Quadro 9 Tabela de Contingência. ....	79
Quadro 10 Classificação dos pontos de inundação conhecidos conforme os modelos AMC-E e AMC-ACP. 4.....	80
Quadro 11 Cálculo do índice crítico de sucesso para os modelos AMC-E e AMC-ACP.....	80
Figura 16 Comparação entre os modelos AMC-E e AMC-ACP. ....	81
Figura 17 Comparação entre agrupamentos do LISA. Modelo AMC-E à esquerda e AMC-ACP à direita.. ....	81
Figura 18 Detalhe da comparação entre o mapa de agrupamentos LISA do modelo AMC-E e os pontos históricos de inundação. ....	82
Figura 19 Detalhe da comparação entre o mapa de agrupamentos LISA do modelo AMC-ACP e os pontos históricos de inundação.. ....	83
Quadro 12 Similaridades e diferenças das classes dos modelos AMC-ACP e AMC-E. ....	83
Figura 20 Similaridades e diferenças das classes dos modelos AMC-ACP e AMC-E. ....	85
Figura 21 Impactos observados e projetados na América do Sul.....	101

## SUMÁRIO

1	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	12
1.1	Justificativa e relevância.....	14
1.2	Objetivos.....	15
2	<b>REFERENCIAL TEÓRICO</b> .....	17
2.2	Risco .....	18
2.3	Vulnerabilidade.....	20
2.4	Cenários .....	24
2.5	Modelos .....	28
3	<b>ÁREA DE ESTUDO</b> .....	31
4	<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	43
4.1	Processamento digital de imagens .....	46
4.2	Análise multicritério em ambiente de sistema de informação geográfica.....	50
4.2.1.1	Análise multicritério ponderada por especialistas (AMC-E) .....	52
4.2.1.2	Análise Multicritério definida pela Análise fatorial por Componentes Principais (AMC-ACP) .....	52
4.2.1.2.1	Análise de componentes principais .....	53
4.2.1.2.2	Determinação de pesos via Análise fatorial por Componentes Principais .....	54
4.3	Verificação da acurácia dos modelos .....	57
4.4	Análise exploratória de dados do modelo.....	61
5	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	63
5.1	Precipitação projetada pelo modelo climático MPI-ESM1.2-HR .....	63
5.1	Modelo de vulnerabilidade à inundação AMC-E .....	66
5.2	Modelo de vulnerabilidade à inundação AMC-ACP.....	73
5.3	Acurácia dos modelos.....	78
5.4	Comparação entre os modelos .....	80
5.5	Discussão .....	86
6	<b>CONCLUSÃO</b> .....	89

<b>REFERÊNCIAS</b> .....	91
<b>APÊNDICE</b> .....	100

## 1 INTRODUÇÃO

As mudanças climáticas têm se mostrado um dos desafios mais urgentes e complexos enfrentados pela sociedade contemporânea. O aumento das temperaturas médias globais, a ocorrência de eventos climáticos extremos e as alterações nos padrões de precipitação têm impactado significativamente diversas regiões, trazendo consigo uma série de riscos e consequências para as comunidades e os ecossistemas.

O Quinto Relatório de Avaliação (AR-5) do Painel Intergovernamental sobre Alterações Climáticas (IPCC, em inglês *Intergovernmental Panel on Climate Change*) elaborado em 2014, aponta que muitos riscos globais das alterações climáticas se concentram em áreas urbanas (IPCC, 2014). Precipitação extrema, inundações, deslizamento de terras, seca e escassez de água representam riscos para pessoas, bens, economias e ecossistemas em áreas urbanas. (IPCC,2014)

O Sexto Relatório de Avaliação do IPCC, traz que mais da metade da população mundial tem passado por escassez severa de água, por, pelo menos, um mês ao ano, ocasionada por alterações climáticas (IPCC, 2021). Em 2021, o Jornal Estado de Minas noticiou a pior crise hídrica em 111 anos (CRUZ, 2021), refletindo nos níveis dos reservatórios de água e podendo causar impactos na geração de energia elétrica e no abastecimento de água.

Ainda conforme o Sexto Relatório de Avaliação do IPCC, eventos climáticos extremos têm afetado a agricultura, pecuária e o setor de pesca. Inundações e eventos têm contribuído para a redução da disponibilidade de alimentos e o aumento de seu valor, criando um risco para a segurança alimentar, nutrição e meios de subsistência para milhares de pessoas no mundo (IPCC, 2021).

### Cenários e Modelos Climáticos:

A projeção das mudanças climáticas é feita através de cenários e modelos climáticos. Os cenários são uma metodologia para imaginar futuros possíveis fundamentados em hipóteses sobre variáveis determinantes do objeto em análise (BUARQUE, 2003; SCHOEMAKER,1995). O Sexto Relatório de Avaliação do IPCC considera quatro possíveis cenários: RCP 2.6, RCP 4.5, RCP 6.0 e RCP 8.5, identificados de acordo com suas forçantes radiativas totais. Esses cenários são essenciais para compreender as possíveis trajetórias futuras

do clima e subsidiar a tomada de decisões relacionadas à adaptação e mitigação das mudanças climáticas (IPCC, 2021)

Já os modelos climáticos são a forma de se representar matematicamente o sistema climático terrestre. Por se tratar de um sistema extremamente complexo, os modelos ainda não são capazes de representá-los em sua totalidade (NAITZEL, 2021; FERREIRA E VALVERDE, 2022). Existem diversos tipos de modelos climáticos. Alguns mais simples, como balanços de energia terrestres e outros mais complexos como Modelos Climáticos Globais (GCM).

Os GCM são amplamente utilizados para obter projeções climáticas e representam uma visão integrada do sistema climático. Porém, devido as suas características não são adequados para estudos realizados em escalas locais. Nesses casos, é necessário maior detalhamento do que o possível de obter com modelos globais. Então é comum a utilização de técnicas de *downscaling*, ou regionalização, visando aumentar a resolução espacial e a obtenção de modelos regionais (RCM), mais adequados à escala de análise (ALVES, 2017; CHOU et al, 2014).

A seção 2.5 deste documento volta a elaborar nestes conceitos.

### Vulnerabilidade

Para Sathler, Paiva e Baptista (2019) a urbanização sem planejamento é associada à concentração de pobreza e vulnerabilidade aos novos riscos ambientais contemporâneos. As cidades, conforme Betim (2020), são os territórios mais vulneráveis às mudanças do clima, pois concentram pessoas, infraestruturas e atividades econômicas suscetíveis aos impactos causados pelas alterações climáticas.

A vulnerabilidade é um conceito amplamente abordado nas literaturas sobre mudanças climáticas, riscos e desastres. Este conceito se divide em duas vertentes principais: a vulnerabilidade física, que se refere aos diversos impactos e choques que afetam os sistemas naturais, e a vulnerabilidade social, que examina o contexto social em que o perigo ocorre e destaca a desigualdade na capacidade de preparação, resposta e adaptação das diferentes populações a esses perigos (Emrich e Cutter, 2011).

De acordo com o IPCC (2014), a vulnerabilidade é definida como uma função da capacidade de adaptação de um sistema e sua sensibilidade. A capacidade de adaptação diz respeito à habilidade de ajustar-se a danos potenciais, reconhecer oportunidades e responder às consequências. Já a sensibilidade é uma característica intrínseca do sistema, que o torna mais vulnerável em comparação a outros (São Paulo, 2023).

Existe, atualmente, um reconhecimento crescente da necessidade de mapear áreas vulneráveis ao risco climático. Consultorias especializadas são contratadas para a elaboração desse material, bem como parcerias entre instituições governamentais e internacionais trabalham com esse objetivo, da compreensão e identificação das áreas vulneráveis ao risco climático, a fim de implementar estratégias eficazes de adaptação e mitigação.

Internacionalmente, a Organização das Nações Unidas e o Banco Mundial contam com publicações de relevância para o estudo da vulnerabilidade climática das áreas urbanas. No Brasil, destacam-se os estudos realizados pelo ICLEI - Governos Locais pela Sustentabilidade e pelo C40 Cities. Desse modo, percebe-se uma série de cidades e governos locais empenhados na elaboração de projetos, planos e programas que visam ações efetivas de mitigação e/ou adaptação às alterações climáticas.

No Brasil pode-se citar os exemplos do município de Santos/SP, através do Plano Municipal de Mudança do Clima de Santos, elaborado em 2016. A cidade de Salvador/BA publicou em 2020 o Plano de Mitigação e Adaptação às Mudanças do Clima de Salvador. O Plano Local de Ação Climática do Recife foi um documento publicado em 2020, em parceria entre a prefeitura municipal de Recife/PE e o ICLEI. Também pode-se citar os municípios de Curitiba/PR, Rio de Janeiro/RJ entre outros.

### 1.1 Justificativa e relevância

Atualmente, na RMBH e no Município de Nova Lima, não são raras as manchetes em jornais e revistas destacando eventos de inundações e enchentes durante o período de chuvas. Muitos desses eventos levam a prejuízo financeiro, enquanto outros ocasionam óbitos. Por exemplo, as chuvas que ocorreram em janeiro de 2022 deixaram 4 mil pessoas desabrigadas em Nova Lima (PORTO, 2022). Em 2023, 22 pessoas perderam suas vidas em decorrência do período chuvoso (“Sobe para 22 o número de mortos durante o período chuvoso em Minas Gerais”, 2023).

Não foram identificados trabalhos específicos destinados à comparação entre métodos, embora existam trabalhos que explorem aspectos isolados desse problema, como áreas de deslizamento ou áreas de inundação.

Outra lacuna é a falta de utilização de técnicas de análise espacial avançadas e modelagem climática para a identificação e projeção das áreas vulneráveis ao risco climático no município de Nova Lima.

Neste contexto, a identificação de áreas que são mais suscetíveis aos riscos climáticos, como inundações, secas, deslizamentos de terra e ondas de calor, permite direcionar os esforços e recursos para implementar medidas adaptativas adequadas. Isso inclui a implementação de infraestruturas resilientes, o desenvolvimento de planos de evacuação e resposta a emergências, o fortalecimento das capacidades de monitoramento e alerta precoce, entre outras ações.

Dessa maneira, o problema de pesquisa do presente trabalho se concentra na proposição e identificação de métodos mais assertivos para a identificação áreas vulneráveis ao risco de inundação projetado para o período 2021 a 2040 em Nova Lima/MG. Portanto, a hipótese desse trabalho é que a comparação de diferentes metodologias de definição de pesos para a análise multicritério permitirá identificar o método mais acurado para mapear áreas vulneráveis ao risco de inundação projetado para o período de 2021 a 2040 em Nova Lima/MG.

Ressalta-se que este trabalho está alinhado com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS): 11 — Cidades e comunidades sustentáveis — Tornar as cidades e comunidades mais inclusivas, seguras, resilientes e sustentáveis e 13 — Ação contra a mudança global do clima — Adotar medidas urgentes para combater as mudanças climáticas e seus impactos.

## 1.2 Objetivos

**Objetivo Geral:** O presente estudo, em forma diagnóstica, tem como objetivo contribuir para o estabelecimento de uma metodologia para o mapeamento de áreas vulneráveis ao risco climático de inundações, através da comparação de metodologias de definição de pesos para a análise multicritério, utilizadas na identificação das áreas vulneráveis a inundações no município de Nova Lima no período de 2021 a 2040. Além disso, visa agregar ao embasamento teórico para a elaboração de medidas de mitigação e/ou adaptação a serem consideradas pelo poder público no planejamento e ordenamento urbano de Nova Lima.

**Objetivos Específicos:**

- Desenvolvimento de base teórico conceitual que embasou a escolha dos métodos de atribuição de pesos de cada modelo e a seleção das variáveis, através da revisão bibliográfica referente à riscos e vulnerabilidade, modelos e projeções climáticas;
- Consolidação dos sistemas de informação geográfica (SIG) que propiciou a realização das modelagens de vulnerabilidade à inundação, utilizando dados geoespaciais ambientais e topográficos;
- Proposta de modelo de análise multicritério subjetivo (ponderado por especialistas) para vulnerabilidade à inundação para Nova Lima no período de 2021-2040, com base na fundamentação teórica conceitual e SIG;
- Proposta de modelo de análise multicritério objetivo (ponderado por análise fatorial por componentes principais) para vulnerabilidade à inundação para Nova Lima no período de 2021-2040, com base na fundamentação teórica conceitual e SIG;
- Escolha do melhor modelo para identificação das áreas de maior vulnerabilidade à inundação em Nova Lima no período de 2021-2040 através da comparação dos modelos com locais históricos de inundação, gerando o Índice Crítico de Sucesso de cada modelo; da análise de dependência espacial e clusters de vulnerabilidade obtidos pelo método LISA.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

Conti (2005) menciona que desde a segunda metade do século XIX já existiam pesquisas visando a confirmação da relação entre a concentração de dióxido de carbono e a elevação da temperatura. Em 1824, o matemático e físico francês Jean-Baptiste Joseph Fourier apresentou a ideia de que a Terra reteria mais energia graças a um painel de moléculas e vapor d'água que capturaria a radiação sobre a Terra para novamente irradiá-la sobre a superfície. Esse processo é o que conhecemos hoje como efeito estufa (ALVES, 2017).

O efeito estufa é um fenômeno natural responsável por propiciar uma temperatura adequada para a vida na Terra e pode ser explicado da seguinte maneira: 1) nem toda a energia solar que incide sobre a Terra é absorvida. Normalmente, a atmosfera (incluindo as nuvens) e a superfície terrestre refletem de volta para o espaço parte dessa energia. Além disso, uma parte da energia que o planeta absorve é reemitida pela Terra para o espaço devido à diferença de temperatura entre Sol e Terra. Essa energia é reemitida em ondas de comprimento longo, infravermelho; e 2) os chamados gases do efeito estufa (GEE), presentes naturalmente na atmosfera, são capazes de absorver parte dessa radiação infravermelha e então essa energia, que seria reemitida para o espaço, é novamente irradiada para a superfície do planeta, aumentando sua temperatura. (JUNGES et al., 2018).

Dentre os GEEs presentes naturalmente na atmosfera terrestre, pode-se mencionar o vapor de água ( $H_2O$ ), dióxido de carbono ( $CO_2$ ), óxido nitroso ( $N_2O$ ), o metano ( $CH_4$ ) e o ozônio ( $O_3$ ). Entretanto, a partir da Revolução Industrial, a humanidade vem também lançando uma importante carga destes gases à atmosfera, que se somam a outros gases de origem industrial, tais como o hexafluoreto de enxofre ( $SF_6$ ), hidrofluorcarbonos (HFCs), clorofluorcarbonos (CFCs) e perfluorcarbonos (PFCs). (IPCC, 2021)

Simplificando, o aumento da concentração de GEEs na atmosfera leva ao aumento da temperatura no planeta. E em um mecanismo de retroalimentação, como Junges et al. (2018) destacam, o aumento da concentração de GEEs também aumenta a capacidade da atmosfera em absorver radiação infravermelha.

No AR 6 é mencionado a Convenção Quadro das Nações Unidas sobre Clima, em inglês, UNFCCC (*United Nations Framework Convention on Climate Change*- Convenção-Quadro das Nações Unidas para Mudanças Climáticas), que define as mudanças climáticas como sendo aquelas mudanças atribuídas direta ou indiretamente à ação humana que altere a composição

da atmosfera global e que se soma à variação natural do clima, observada em períodos comparáveis. O presente trabalho irá adotar, em confluência com o UNFCCC a distinção entre mudanças climáticas, agora definida, e variação climática — aquela de origem natural (IPCC,2021).

## 2.2 Risco

O conceito de risco é multiescalar e aceita diversos entendimentos em função de sua presença nos diversos campos do conhecimento. Pode ser definido como polissêmico e multidisciplinar. Portanto, é comumente acompanhado por um adjetivo que defina sua natureza: natural, ambiental, social, tecnológico, industrial, entre outros. (OLIVEIRA,2021; ALMEIDA,2010)

A etimologia da palavra chega até a idade média. Veyret (2007) aponta que a palavra risco contempla tanto um perigo potencial, quanto a sua percepção. Também indica a situação percebida como perigosa. As definições mais usuais de risco irão orbitar a probabilidade do perigo (ALMEIDA,2010; DAGNINO E CARPI JÚNIOR,2007). Também pode-se acrescentar à essa definição as perdas que a população pode sofrer em decorrência do acontecimento dos perigos aos quais o risco faz menção.

Ferreira, Monteiro e Madureira (2019) ressaltam que o entendimento do que é risco é uma construção social e está relacionada com como uma sociedade que se organiza e vem se organizando num processo histórico.

Para Almeida (2010), "É incontestável a onipresença do risco". Para a autora, as interpretações do que é risco foram mudando conforme a sociedade. De modo que o risco não deixa de existir, apenas varia no tempo e no espaço. Rammê (2012) destrincha a discussão de risco com base no que diz o sociólogo alemão Ulrich Beck. Para o filósofo, o contexto social vem vivendo profunda transformação, o que origina uma "sociedade de riscos".

Para Silveira (2014), a ação antrópica tende a potencializar os riscos naturais, seja de forma consciente ou não. No mesmo sentido, Veyret (2007) argumenta sobre os riscos ambientais serem a "associação entre os riscos decorrentes de processos naturais agravados pela atividade humana e pela ocupação do território".

O risco climático é definido pelo Painel Intergovernamental sobre Mudança do Clima como o potencial de consequências adversas para a humanidade ou sistemas ecológicos. Os riscos resultam da interação entre os perigos relacionados ao clima com a exposição e a vulnerabilidade do sistema, seja humano ou ecológico (Figura 1). Perigos, exposição e vulnerabilidade estão sujeitos a incertezas de magnitude e probabilidade de ocorrência e podem ser influenciados e alterados de acordo com intervenções humanas. (IPCC, 2021)

A interação entre vulnerabilidade, exposição e perigo climático como componentes do risco está presente em diversos trabalhos. Por exemplo Dias (2016), Mendonça (2011), Martins e Ferreira (2012), Nascimento Junior (2019) e Oliveira (2021). A relação entre risco e vulnerabilidade pode ser assim definida: “Risco climático” é a probabilidade de um perigo e seus impactos potenciais acontecerem, enquanto os impactos são determinados pelo quanto um sistema de interesse está exposto e vulnerável a tal perigo climático. Por fim, a vulnerabilidade é dada pela sensibilidade do sistema (o quanto pode ser afetado) e sua capacidade de adaptação (IPCC, 2014).

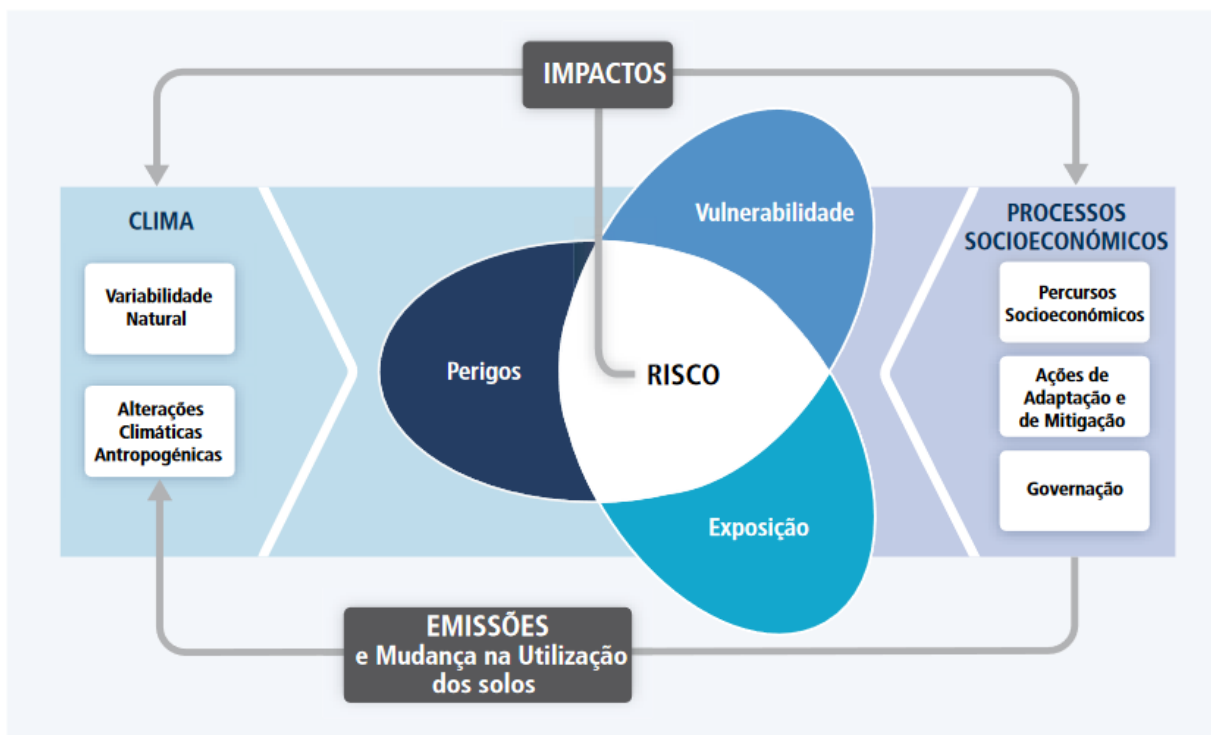


Figura 1 Ilustração da relação entre os componentes do risco climático: Vulnerabilidade, perigo e exposição. Fonte: Adaptado de IPCC, 2014.

### Riscos-Chave

Conforme IPCC (2021), alguns dos riscos-chave associados aos perigos climáticos são:

- Risco a vida e infraestruturas em decorrência de inundações e deslizamentos;

- Risco de efeitos graves para a saúde devido ao aumento de epidemias (em particular doenças transmitidas por vetores);
- Riscos sistêmicos de sobrecarga dos sistemas de infraestrutura e serviços públicos;
- Riscos de insegurança hídrica.

Estes riscos já são enfrentados nas áreas urbanas da Região Metropolitana de Belo Horizonte (RMBH) e em outras em outras metrópoles brasileiras: chuvas intensas, secas, enchentes, ondas de calor e de frio. Porém, destaca-se a potencialização destes riscos, e dos impactos biofísicos e socioeconômicos destes fenômenos, nas áreas expostas de maior vulnerabilidade. Para Alves (2017), as maiores ameaças nas áreas urbanas estão relacionadas ao aumento da frequência e magnitude dos eventos extremos.

Silveira (2014) afirma que a urbanização sem planejamento adequado expõe os habitantes das cidades aos eventos climáticos de forma mais intensa. Monteiro (1976) exemplifica: períodos de estiagem podem significar problemas no abastecimento de água e na geração de energia elétrica e eventos de chuva intensa podem levar a inundações, ainda que de origem natural. Contudo, nesses casos, as cidades são mais afetadas à medida que as ocupações irregulares das margens de cursos d'água e a impermeabilização do solo urbano são acentuadas e desordenadas.

Sathler, Paiva e Baptista (2019) afirmam que os riscos e impactos causados pelas mudanças climáticas são visíveis em centros urbanos de diferentes portes populacionais, condições econômicas e características geográficas. Contudo, as regiões metropolitanas destacam-se por sua maior densidade populacional, relevância econômica e complexidade dos fenômenos e dinâmicas espaciais, esse último também por conta das precariedades e alto nível de vulnerabilidade social às mudanças climáticas.

### 2.3 Vulnerabilidade

Ribot (2017) traz que no antropoceno, os eventos climáticos associados à desastres não podem mais ser entendidos como atos de Deus ou da natureza. Eles são, pelo menos em parte, relacionados com a humanidade e esta tem responsabilidade sobre essas catástrofes.

Assim, podemos dar início a conceituação de vulnerabilidade. Vulnerabilidade é um conceito amplo, uma construção multidimensional e multicamadas. (CUTTER & FINCH,

2008; BOHLE et al, 1994). A vulnerabilidade é um processo dinâmico que varia ao longo do tempo e do espaço (CUTTER et al, 2003; ADGER, 2006).

Emrich e Cutter (2011) trazem que vulnerabilidade é amplamente usada nas literaturas de mudanças climáticas, perigos e desastres. São apresentadas duas nuances da vulnerabilidade. O que é chamado de vulnerabilidade física (*physical vulnerability*) que explica os diferentes impactos de choques ou estresses aos sistemas naturais e suas habilidades de absorver e resistir a esses impactos.

A segunda nuance é a da vulnerabilidade social (*social vulnerability*) que fornece o contexto social em que esses agentes estressantes operam e aponta a capacidade social desigual de preparação, resposta, recuperação e adaptação às ameaças ambientais.

Martins e Ferreira (2012) ao debaterem sobre as várias faces da vulnerabilidade apontam que independentemente da vulnerabilidade física ou social, o que há de comum nessas concepções é que todas são sobre algo ou alguém a partir de um lugar específico (grupo populacional, comunidade, cidade, região etc.) fragilizado mediante um perigo (para além das manifestações físicas das mudanças climáticas).

A vulnerabilidade física é também aquela que enxerga a vulnerabilidade como a extensão ou potencial de danos causados pelos eventos da dinâmica do clima. Nesse caso, a investigação é centrada em determinar a exposição humana aos diferentes perigos, com pouca atenção à capacidade desses grupos em responder a esses impactos de forma reativa ou antecipada. Assim sendo, a vulnerabilidade seria uma função entre a geofísica do perigo, a probabilidade de sua ocorrência, a exposição humana ao perigo e por fim, sua sensibilidade. (MARTINS E FERREIRA, 2012)

Essa perspectiva é trabalhada por diversos autores. Watts e Bohle (1993) apontam a vulnerabilidade como resultado da exposição, capacidade e potencialidade. Portanto, a resposta à vulnerabilidade é reduzir a exposição, aumentar a capacidade de enfrentamento, fortalecer o potencial de recuperação e forçar o controle de danos por meio de políticas públicas ou ações privadas.

Nobre et al (2010) também apresentam a ideia de que a vulnerabilidade tem origem na exposição de populações e lugares à determinados fenômenos perigosos com dada severidade, de acordo com sua localização e resiliência intrinsecamente ligada a diferentes condições ambientais, sociais econômicas e políticas.

Santos (2015) traz que a vulnerabilidade está associada à grupos sociais específicos, que por estarem em um dado território, encontram-se expostos a um determinado fenômeno e fragilizados em sua capacidade de compreender e enfrentar esses riscos. O autor complementa que a vulnerabilidade é um conceito-chave na análise integrada de riscos pois é capaz de levantar aspectos éticos, políticos, físicos e técnicos que definem os aspectos espaciais dos riscos e trazem à luz a capacidade que a população tem de enfrentá-los.

Para Cutter et al (2003) a vulnerabilidade é o conjunto de condições físicas, sociais e econômicas que incidem na possibilidade de afetar pessoas de um sistema social e ou natural, devido à ocorrência de fenômenos naturais. De maneira geral, vulnerabilidade para perigos ambientais é o potencial de perdas. Como as perdas variam ao longo do espaço, entre diferentes grupos sociais, vulnerabilidade também varia ao longo do tempo e do espaço.

Essa definição apontada por Cutter é interessante pois aponta que o conjunto de condições físicas, sociais e econômicas que podem afetar pessoas em diversos sistemas. Aqui, começamos a observar uma das dimensões da vulnerabilidade: A vulnerabilidade social.

A vulnerabilidade, nessa perspectiva é tratada como uma condição ou característica intrínseca de uma determinada unidade de análise. Sendo então tratada como algo que está no interior do sistema de análise, sendo independente do perigo em questão. É pré-existente do lugar. (MARTINS E FERREIRA, 2012; RIBOT, 2017; EMRICH E CUTTER, 2011)

Naylor et al. (2020) trazem, na perspectiva da vulnerabilidade social, que essa é um produto exclusivo das características socioeconômicas e políticas internas do sistema. Sendo então para Cutter et al (2003), o produto das desigualdades sociais. Canil et al (2020) complementa com a importância de se pensar o território como uma área de disputas de poder, consequentemente, conflitos. Dessa maneira, a vulnerabilidade de um território deve ser pensada como um processo, como uma construção histórica. A vulnerabilidade de um território para os autores deve ser pensada para além de dados técnicos como infraestrutura (ou sua ausência) mas pelo processo histórico que levou aquele lugar a um contexto de injustiça social.

Emrich e Cutter (2011) apontam que separar a vulnerabilidade social do perigo é interessante para se determinar a vulnerabilidade na paisagem. Naylor et al (2020) dizem que essa separação é um artifício útil para tomadores de decisão pois permite a elaboração de políticas públicas de maneira geral para a vulnerabilidade e não diversas políticas públicas a depender do perigo.

Ribot (2017) aponta que a análise separada entre vulnerabilidade e perigo é necessária para entender as estruturas que geram as vulnerabilidades. O autor faz crítica à maior parte dos modelos de análises de vulnerabilidade climática pois, segundo ele, existe a maior preocupação em identificar quem é vulnerável ao invés de porquê, bem como trazer indicadores em detrimento de explicações e ajustes (adaptações) no lugar de causas. Para o autor, o objetivo de uma análise de vulnerabilidade é identificar o processo que produz a vulnerabilidade e então identificar as que são passíveis de reparação.

Para Cutter et al (2003) a vulnerabilidade social é amplamente ignorada devido à dificuldade de quantificá-la, complementado por Adger (2006) que aponta uma grande dificuldade em identificar métricas para a vulnerabilidade. O que também explica a crítica trazida por Ribot (2017). Wisner e Al (2008), contribuem dizendo sobre o grande interesse em quantificar a vulnerabilidade e que isso levou a debates sobre o equilíbrio entre dados quantitativos e qualitativos e se é realmente possível quantificar a vulnerabilidade.

Até o Quarto Relatório de Avaliação (AR4) do Intergovernamental Panel on Climate Change (IPCC), publicado em 2007, a vulnerabilidade era composta por três elementos: exposição, sensibilidade e capacidade de adaptação, seguindo a linha apresentada até agora (IPCC, 2007).

Obermaier e Rosa (2013), aponta sobre as definições do IPCC que fica explícito a importância de identificar a causa e efeito da vulnerabilidade e então determinar caminhos que conseguem aumentar a capacidade adaptativa da sociedade.

Menezes et al (2018) bem como Pinto (2019) resumem essa ideia como as condições de exposição, sensibilidade e capacidade de adaptação determinam o perfil de vulnerabilidade de uma população. Pode-se destrinchar melhor os conceitos de exposição como quem ou o que está em risco; sensibilidade como o grau que as pessoas e lugares podem ser prejudicados e capacidade de adaptação como a habilidade de se adaptar aos impactos (CAVALCANTI, 2015; OBERMAIER E ROSA, 2013)

A partir do AR5, o IPCC mudou a forma da definição de vulnerabilidade e retirou a exposição da fórmula. Desse modo, vulnerabilidade passa corresponder pela pseudo-fórmula  $V = S * CA$  (Onde S: Sensibilidade e CA: Capacidade de Adaptação). A exposição foi agregada à análise do risco climático (IPCC, 2014).

Para RÄSÄNEN et al (2016) essa mudança, não significa que os fatores sociais ganharam destaque na modelagem da vulnerabilidade ou que desempenhem um papel central no modelo de análise de risco climático do IPCC, nem nos trabalhos que utilizem essa metodologia.

Em uma terceira frente, Naylor et al (2020) traz que as abordagens híbridas têm se multiplicado nas análises sobre as mudanças ambientais globais. Para Emrich e Cutter (2011) é apenas quando integramos espacialmente a exposição com a vulnerabilidade social é que se pode representar adequadamente o nível de perigosidade dos lugares. Dessa maneira, as vulnerabilidades sociais e biofísicas interagem para produzir a vulnerabilidade geral do lugar e sua capacidade de enfrentamento (CUTTER et al, 2003; ADGER, 2006).

O que retorna a uma perspectiva multidimensional e que compreende a exposição de um sistema complexo aos riscos e a sua capacidade de resposta, sendo está determinada, no caso de grupos sociais, pelo seu nível de pobreza, definido pelo contexto político, histórico e cultural (SANTOS, 2015).

O conceito de vulnerabilidade fica menos abstrato quando se propõe a responder as questões: Quem é vulnerável? A quê? Por quê? Em quais condições é capaz de se adaptar? (OBERMAIER e ROSA, 2013; CAVALCANTI, 2015)

Para Obermaier e Rosa (2013) o que pode ser feito para que a vulnerabilidade seja reduzida, além de tornar os sistemas socioambientais mais resilientes demandará uma abordagem cooperativa e integrativa. Em uma perspectiva mais radical, Ribot (2017) levanta que assim como não existe desastre sem perigo, em um cenário sem vulnerabilidade, o perigo é nulo.

Ferreira, Monteiro e Madureira (2019) discorrem que uma cidade que apresentar habitações com boas condições de moradia, saneamento básico, infraestrutura, vias públicas em boas condições de acesso, sistema de saúde e demais elementos básicos de qualidade de maneira acessível à população apresentará menor vulnerabilidade aos elementos do risco climático do que aquelas onde esses elementos são deficitários ou ausentes.

## 2.4 Cenários

Conforme Buarque (2003) à medida que a realidade foi se tornando mais complexa, que mudanças se tornam mais rápidas e aumentam as incertezas com relação ao futuro, os velhos métodos que criavam definições generalistas sobre o futuro precisaram ser abandonados. Nessa perspectiva, a construção de cenários ganha espaço, pois cada vez mais se faz necessário antecipar e adaptar a eventos futuros (BORJESON et al. 2006).

Assim, cenários são o conjunto de futuros razoavelmente plausíveis, que contam com diferenças estruturais, concebidos por meio de um processo de reflexão mais causal que probabilístico, usado como meio para a reflexão e a formulação de estratégias para atuar nos modelos de futuros (HEIJDEN, 2005).

A construção de cenários é, para Schoemaker (1995), uma metodologia para imaginar futuros possíveis. Portanto, contam uma história sobre como vários elementos podem interagir sobre certas condições (BUARQUE, 2003; SCHOEMAKER, 1995). Além disto, segundo Borjeson et al (2006), o estudo de cenários também auxilia na identificação de tendências.

Por outro lado, não é objetivo do estudo de cenários a pretensão de eliminar as incertezas ou adivinhar o que irá acontecer. A construção de cenários busca analisar e sistematizar as diversas probabilidades dos eventos e processos, explorando pontos de mudanças e tendências (BUARQUE, 2003). Conforme o IPCC (2021) cenários devem ser utilizados para fornecer uma visão das implicações dos desenvolvimentos e ações.

Conforme Buarque (2003) a construção de cenários lida com sistemas que são altamente complexos e dinâmicos, que tem como característica principal elevado grau de incerteza e mudanças estruturais contínuas. Esses cenários lidam com realidades em que uma mudança não necessita ser proporcional às suas causas. Dessa maneira, cenários são mais do que o resultado da simulação de um modelo complexo, pois interpretam o resultado identificando padrões e aglomerações dentro das milhões de possibilidades de resultados de uma simulação de computador. (SCHOEMAKER, 1995)

Os cenários também podem incluir variáveis que não estão ou não podem ser modeladas formalmente. O cenário permite capturar a riqueza e amplitude de possibilidades, simulando tomadas de decisão que poderiam ser ignoradas. Ao mesmo tempo, organiza essas possibilidades em narrativas que são mais fáceis de compreender e usar do que grandes volumes de dados (SCHOEMAKER, 1995).

De maneira geral, os cenários podem ser divididos em dois grandes grupos: cenários exploratórios e cenários desejados, ou normativos. Para Buarque (2003) os cenários exploratórios são essencialmente técnicos. São frutos do tratamento racional das probabilidades, excluindo as vontades e desejos daquele que faz a análise. Esses cenários apontam para onde está indo à realidade do objeto de estudo para que tomadores de decisão possam escolher suas ações.

Os cenários desejados buscam trazer o desejo do tomador de decisões. O cenário desejado é entendido como uma utopia plausível, capaz de ser efetivamente construída no mundo real. Esses cenários são comumente utilizados para o planejamento governamental pois procura administrar o futuro com base no desejo (ou possibilidades de ação) (BUARQUE, 2003).

O IPCC (2021) trabalha com dois tipos de cenários para a modelagem das projeções climáticas: cenários de concentração e cenários de emissão. Os cenários de concentração representam o desenvolvimento futuro plausível das concentrações atmosféricas de substâncias radiativamente ativas (GEE, por exemplo) bem como as mudanças na cobertura terrestre causadas pela ação antrópica, que podem se tornar radiativamente ativas pela mudança no albedo<sup>1</sup> (IPCC, 2021).

Os cenários de emissão trazem o desenvolvimento futuro plausível das emissões de substâncias radiativamente ativas – como GEE ou aerossóis e tem como base um conjunto coerente e internamente consistente de suposições sobre quais são as forças motrizes dessa emissão e suas principais relações. Além disso, são considerados nos cenários possíveis estratégias de mitigação e adaptação.

As projeções contempladas nos cenários são quantitativas baseadas em uma série de suposições, incluindo variáveis socioeconômicas e opções de mitigação, e, para IPCC (2021) não devem ser interpretados como previsões ou prognósticos.

O termo *Pathways* ou caminhos, em português, também é utilizado nos relatórios produzidos pelo IPCC. Os *pathways* são a evolução temporal de sistemas naturais e/ou

---

<sup>1</sup> É a medida da quantidade de radiação solar refletida por um corpo ou uma superfície, sendo calculado como a razão entre a quantidade de radiação refletida e a quantidade de radiação recebida Mudanças Climáticas Globais”, [s.d.]

antrópicos em direção a um estado de futuro. São o resultado da análise a partir de cenários qualitativos e quantitativos de futuros potenciais e são utilizados no processo de tomada de decisão.

O IPCC (2021), no âmbito do AR-6, avaliou a resposta climática a cinco cenários ilustrativos baseados nos Caminhos Socioeconômicos Compartilhados (SSPs), que cobrem a gama de possíveis desenvolvimentos futuros dos fatores antropogênicos das mudanças climáticas encontrados na literatura.

Cenários de emissões de GEE altas e muito altas (SSP3-7.0 e SSP5-8.5) têm emissões de CO<sub>2</sub> que aproximadamente dobram dos níveis atuais até 2100 e 2050, respectivamente. O cenário intermediário de emissões de GEE (SSP2-4.5) mantém as emissões de CO<sub>2</sub> em níveis próximos aos atuais até meados do século XXI. Os cenários de emissões muito baixas e baixas de GEE (SSP1-1.9 e SSP1-2.6) têm emissões de CO<sub>2</sub> que caem para zero líquido por volta de 2050 e 2070, respectivamente, seguidas por níveis variados de emissões negativas líquidas de CO<sub>2</sub>.

Além dos SPP, foram considerados os cenários de concentração representativa (RCP em inglês, abreviação para *representative concentration pathways*) são cenários que incluem uma série temporal de emissão e concentração dos GEE, aerossóis e outros gases quimicamente ativos, bem como a mudança do uso e cobertura do solo.

O termo representativo significa que aquele cenário, dentre inúmeros outros possíveis, representa aquela força radiativa em específico (IPCC, 2021). Ou seja, esses cenários consideram os impactos das emissões e concentrações no balanço de radiação no sistema terrestre.

Os RCP são identificados por sua forçante radiativa total, expressa em W/m<sup>2</sup> (watt, por se tratar de fluxo de energia) a ser atingida até 2100. O termo denominado forçante radioativa é a diferença da irradiância líquida na tropopausa, de um estado de referência e um estado perturbado (MARCOS JUNIOR, 2017). Conforme Alves (2017) esses forçamentos podem ter origens naturais, como por exemplo a variação da radiação solar, ou antrópica via atividades que resultam na emissão de GEE.

Desse modo, cada RCP considera dados espacialmente distribuídos de mudanças de uso da terra, emissões setoriais de poluentes do ar e concentrações anuais de GEE, bem como as emissões antropogênicas até 2100.

O AR-6 contempla quatro RCPs (IPCC, 2021):

- RCP 2.6: Trata-se de um cenário de baixas emissões de GEE, sendo, um cenário otimista. Em suas projeções, o forçamento radioativo primeiro atinge o valor de 3,1 W/m<sup>2</sup> e então decairia para 2,6 W/m<sup>2</sup> até 2100. Soares (2023) comenta que para que tais níveis sejam alcançados, é necessário que as emissões de GEE e de poluentes sejam substancialmente reduzidas ao longo do tempo.
- RCP 4.5 e 6.0: Cenários de estabilização intermediários, em que o forçamento radioativo varia entre 4,5 e 6 W/m<sup>2</sup> em 2100.
- RCP 8.5: Um cenário pessimista, que considera o aumento das emissões de GEE ao longo do tempo.

A relação entre os SSP e os RCP bem como sua descrição é apresentada no Quadro 1.

Quadro 1 Descrição e relação entre cenários (RCP) e Caminhos modelados considerados no AR-6. Os valores preenchidos com NA não possuem correlação entre cenários. Fonte: Adaptado de IPCC (2021).

Descrição da Categoria	Cenários de emissões de GEE (SSP)	RCP
Limitar o aquecimento a 1,5°C (50%) com nenhum ou pequeno excesso	Muito baixa (SSP1-1.9) Baixa (SSP1-2.6)	NA
Retornar o aquecimento à 1,5°C (50%) após um alto excesso	NA	
Limitar o aquecimento a 2°C (67%)	Baixa (SSP1-2.6)	RCP2.6
Limitar o aquecimento a 2°C (50%)	NA	NA
Limitar o Aquecimento a 2,5°C (50%)	NA	NA
Limitar o aquecimento a 3°C (50%)	Intermediária (SSP2-4.5)	RCP 4.5
Limitar o aquecimento a 4°C (50%)	Alta (SSP3-7.0)	NA
Exceder o aquecimento de 4°C (50%)	Muito alta (SSP5-8.5)	RCP 8.5

## 2.5 Modelos

Modelar o clima é representar matematicamente o sistema climático terrestre. Essa representação deve incluir o comportamento da atmosfera, criosfera, hidrosfera, litosfera e suas interações, visando a obtenção da previsão de várias escalas de tempo. (NAITZEL, 2021). Conforme Naitzel (2021), existem diversos tipos de modelos climáticos como balanços de energia, que são modelos mais simples quando comparados a complexos Modelos do Sistema

Terrestre (ESM). Cabe destacar que, quanto mais complexos forem os modelos, mais recursos tecnológicos, financeiros e de tempo serão necessários para sua implementação IPCC (2014).

Ainda para Naitzel (2021) modelos climáticos são as principais ferramentas para analisar a resposta dos sistemas climáticos à forçantes, bem como para realizar projeções climáticas. Contudo, apesar dos múltiplos aprimoramentos dos modelos e cenários de emissões, erros relacionados à modelagem são uma realidade, pois sistemas climáticos são extremamente complexos e modelos não conseguem reproduzi-los em sua totalidade (FERREIRA e VALVERDE, 2022)

Conforme Alves (2017) os modelos climáticos globais, como os Modelos Climáticos Globais (GCMs) ou Modelos Globais Acoplados Oceano-Atmosfera (AOGCMs), são amplamente utilizados para obter projeções climáticas e representam uma visão integrada do sistema climático, considerando as interações entre atmosfera, oceano e outros processos importantes.

No entanto, quando se trata de estudos de impactos, vulnerabilidade e adaptação às mudanças climáticas em escalas locais, é necessário um maior detalhamento do que os modelos climáticos globais podem oferecer. Nesses casos, é comum empregar técnicas de *downscaling* ou regionalização para aumentar a resolução espacial e obter modelos regionais (RCMs) que sejam mais adequados para estudos locais (ALVES, 2017; CHOU et al, 2014).

Conforme Ambrizzi et al (2018), os modelos climáticos regionais (RCM) surgiram no final da década de 1980 com o objetivo de aprimorar a simulação do clima em regiões onde forças meso-escalares modulam o clima regional. Pois, conforme os autores, os modelos climáticos globais não eram capazes de interpretar características locais como a geomorfologia do terreno, uso do solo e forçantes meso-escalares influenciam o clima local.

Dessa maneira, visando aumentar a resolução desses modelos (através do *downscaling*) são necessários recursos computacionais consideráveis e parametrizações físicas apropriadas para trabalhar com alta resolução. Assim, espera-se que os modelos regionais possam resolver as circulações meso-escalares, como brisas marítimas-terrestres e brisas de vale-montanha, e representar de forma mais realista o clima regional/local em comparação com os GCMs (AMBRIZZI et al, 2018).

No Brasil, o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) via trabalhos de Chou et al (2014) realizou a regionalização através do modelo regional Eta, que foi aninhado aos

modelos globais HadGEM2-ES e MIROC5. Conforme Chou et al (2014) o Eta RCM é aplicado para gerar quatro simulações de *downscaling* de mudanças climáticas. Dois GCMs, o HadGEM2-ES e o MIROC5, e dois cenários AR5 IPCC, RCP 4.5 e RCP 8.5, forçam as simulações.

Essas simulações forneceram dados simulados em alta resolução espacial para toda a América do Sul, tanto para o clima atual como para projeções futuras, com base nos cenários de emissão RCP 4.5 e RCP8.5. No entanto, é importante considerar as limitações e incertezas associadas às projeções de cenários climáticos, mesmo quando se utiliza a abordagem de modelos regionais (ALVES, 2017).

### **3 ÁREA DE ESTUDO**

A presente proposta de trabalho se propõe a realizar um estudo de caso. Esse é um método de pesquisa que, conforme Yin (2003) é entendido como uma delimitação adequada para a investigação de um fenômeno dentro de seu contexto real. Foi definido com unidade-caso o município de Nova Lima.

Nova Lima é um município mineiro cuja fundação remonta o final do século XIX. O município é integrante da Região Metropolitana de Belo Horizonte (Mapa 1). Conforme o censo demográfico de 2022 o município de Nova Lima tem 111.697 habitantes, sendo o 27º município mais populoso do estado de Minas Gerais. O município tem área de 428,449 km<sup>2</sup>, o que resulta em uma densidade demográfica de 260,18 habitantes por quilômetro quadrado (BRASIL, 2023).



O município de Nova Lima está localizado na Bacia Hidrográfica do Rio das Velhas, localizado na região fisiográfica do Alto Rio das Velhas. O território da bacia hidrográfica do Rio das Velhas, enquanto unidade de gestão e gerenciamento de águas, é dividido em 23 Unidades Territoriais Estratégicas (UTES) e Subcomitês. Nova Lima está localizada na UTE Águas da Moeda (COMITÊ DE BACIA HIDROGRÁFICA RIO DAS VELHAS, 2023).

As principais hidrografias da UTE Águas da Moeda são o Rio do Peixe, Ribeirão dos Marinhos, Ribeirão Congonhas, Ribeirão Cardoso, Ribeirão Cristais, Córrego Padre Domingos, Córrego Água Limpa, Córrego Fazenda Velha e Córrego Fechos e o Rio das Velhas (COMITÊ DE BACIA HIDROGRÁFICA RIO DAS VELHAS, 2023). Conforme mostra o Mapa 2.

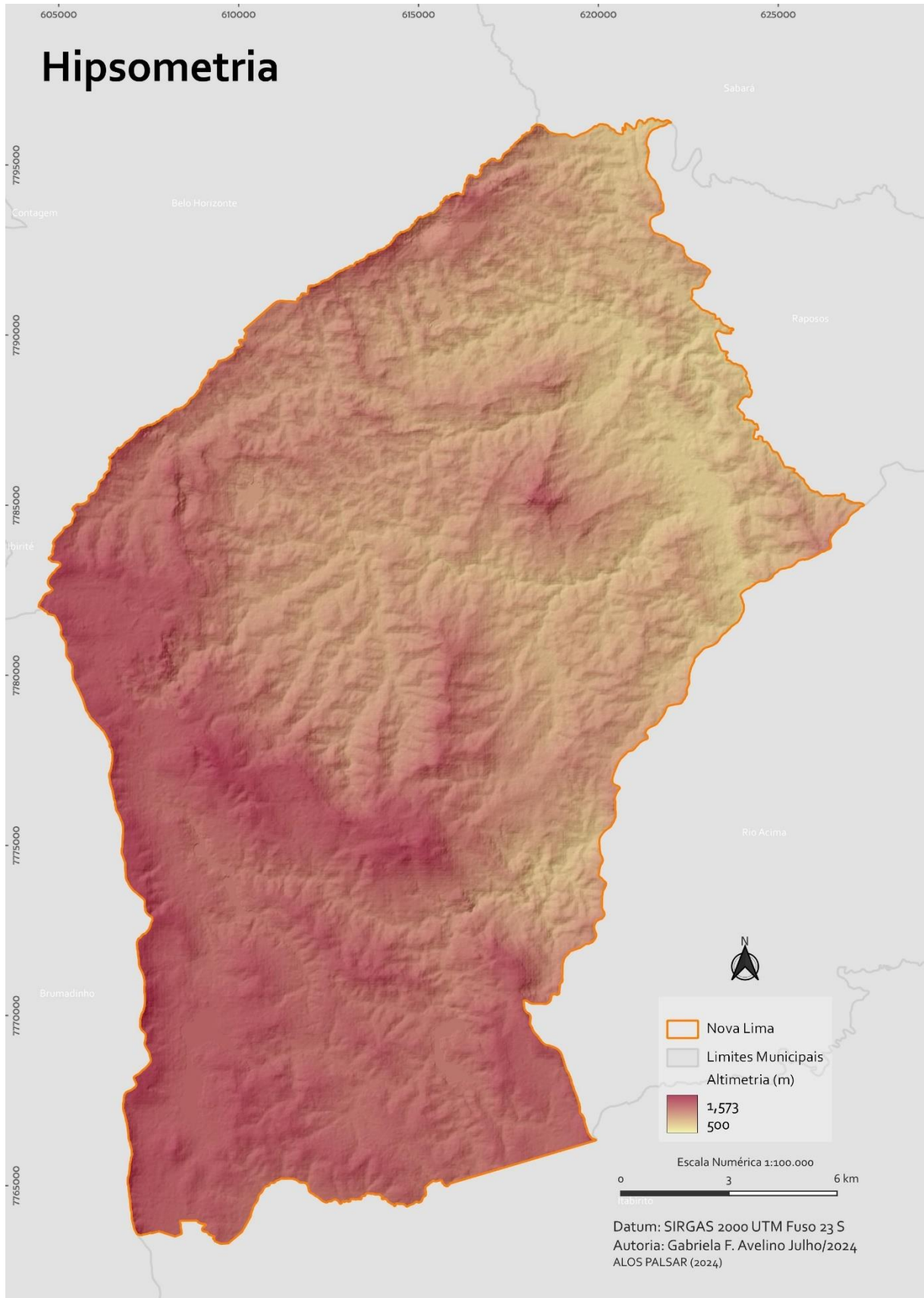


Mapa 2 Mapa de Hidrografia. Fonte: Elaborado pela autora, 2024.

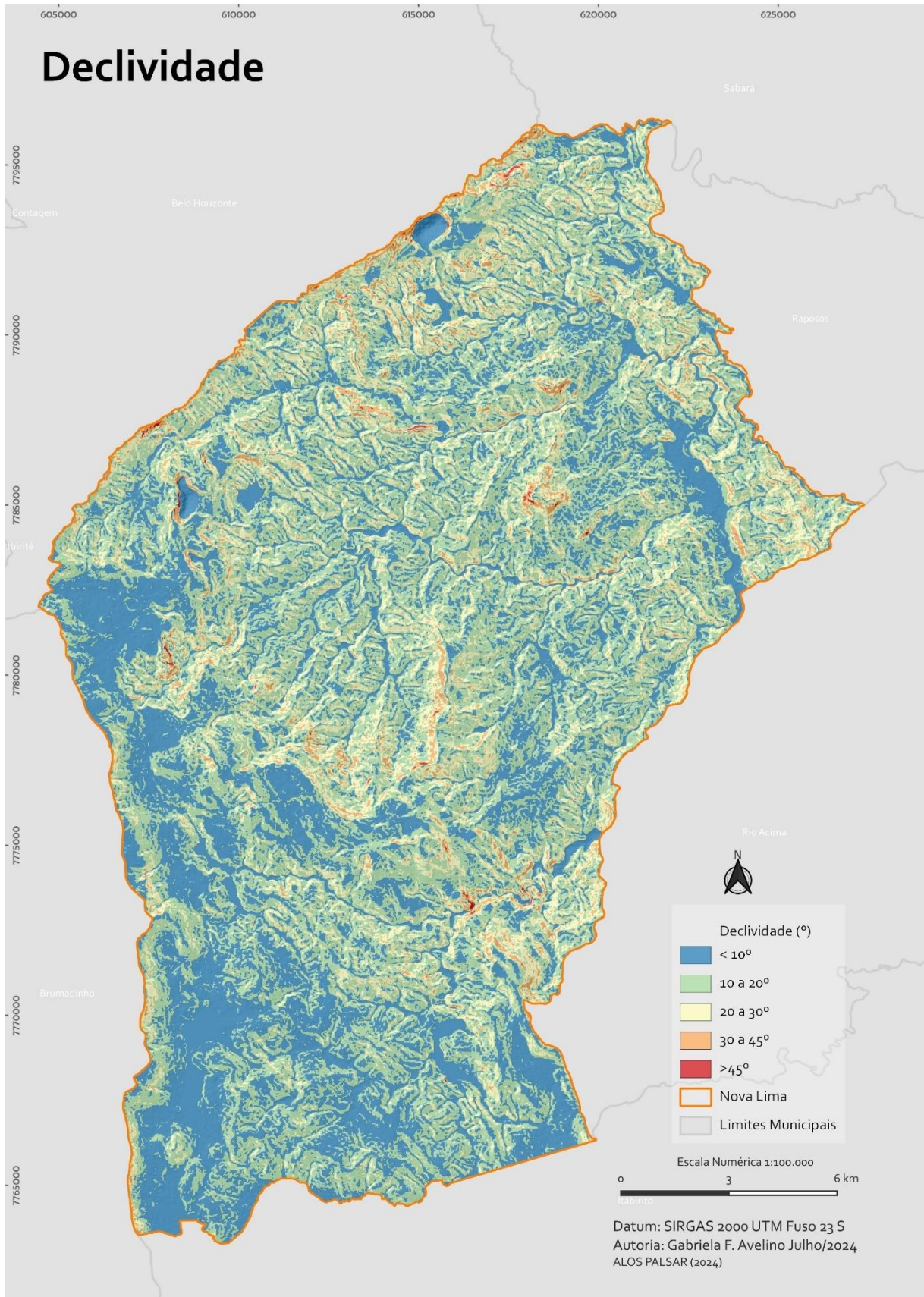
Geologicamente, Nova Lima está situada sobre as rochas do Quadrilátero Ferrífero. Essa é uma estrutura geológica contígua a Serra do Espinhaço, com a forma similar a um quadrado e área aproximada de 7.000km<sup>2</sup>. A geologia da província mineral é complexa, mas Lamounier et al (2010) apresentam um resumo: embasamento cristalino, arqueano, composto de granitos, gnaisses e migmatitos; Supergrupo Rio das Velhas, composto de quartzitos, xistos e filitos que constituem um greenstone belt; Supergrupo Minas, proterozóico, constituído por rochas metassedimentares; Grupo Itacolomi, também de idade proterozóica, constituído de quartzitos.

No quadrilátero ferrífero, a diversa gama litológica em associação aos diversos tipos de arranjo estruturais permite um amplo leque de possibilidades para as formas das vertentes. O diagnóstico realizado pelo CPRM no âmbito do Projeto APA Sul RMBH – Estudos do Meio Físico (CPRM, 2005) divide o relevo de Nova Lima em três unidades geomorfológicas: (i) Crista Monoclinal da Serra do Curral, que ocorre na porção noroeste do município, onde pode alcançar até 1400m, na divisa com Belo Horizonte.

Destaca-se a linha de cumeada estruturada sobre itabiritos da Formação Cauê. A crista apresenta vertentes muito inclinadas e até paredões subverticais. (ii) Platô Sinclinal Moeda composto de áreas com altitude entre 1500 e 1600m, onde predominam processos erosivos em detrimento de processos pedogenéticos; (iii) Vale Anticlinal do Rio das Velhas, localizado na porção central do município e composto basicamente de morros de topos alinhados, com altitudes entre 1000 e 1200m. A hipsometria e a declividade do município são apresentadas nos Mapa 3 e Mapa 4, respectivamente.

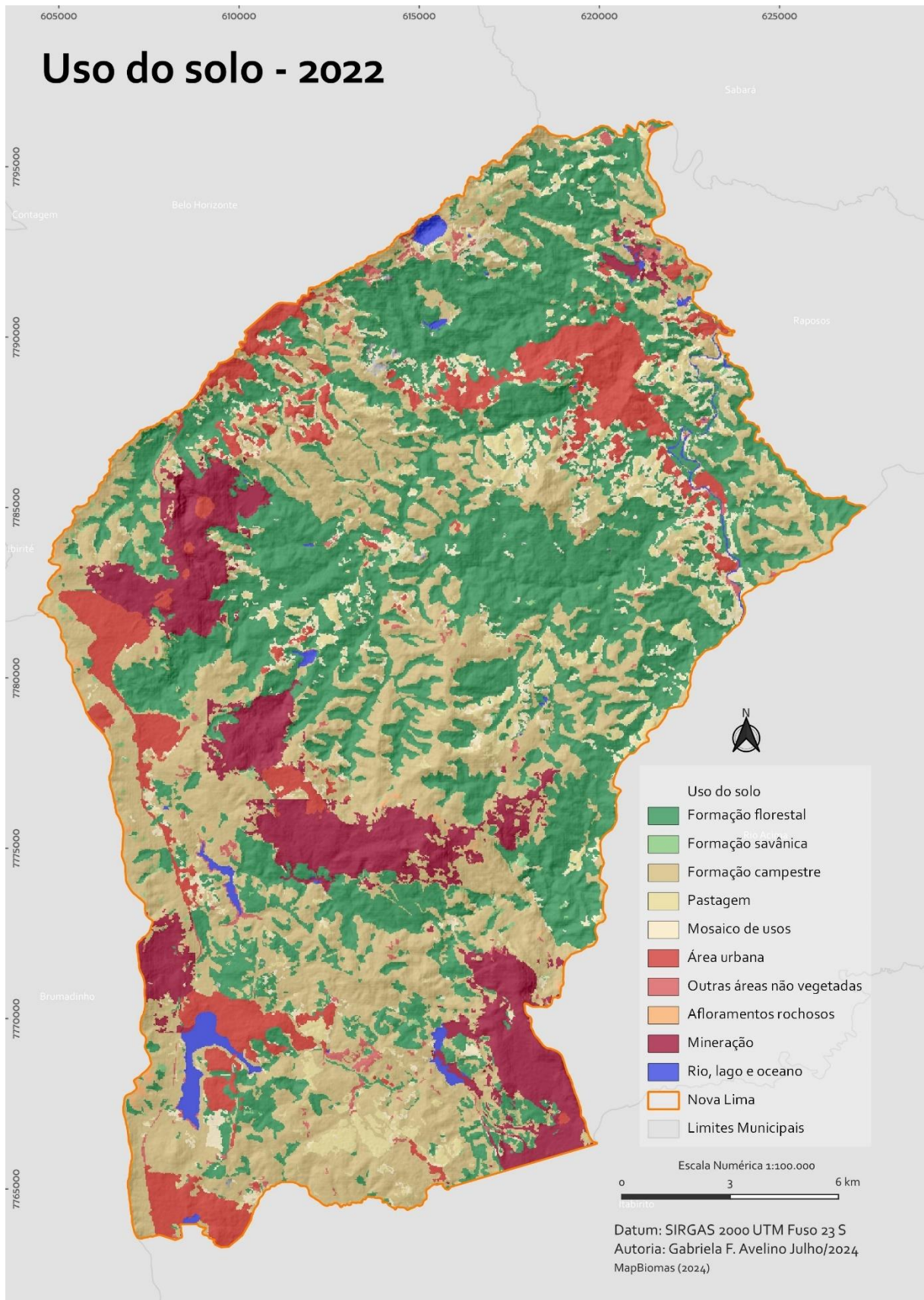


Mapa 3 Mapa de Hipsometria. Fonte: Elaborado pela autora, 2024.



Mapa 4 Mapa de declividade. Fonte: Elaborado pela autora, 2024.

Conforme o mapeamento de uso e cobertura do solo, para o ano de 2022, disponibilizado pelo MAPBIOMAS (2022), Nova Lima (Mapa 5) tem 70,66% do seu território sem ocupação antrópica. Esse total pode ser dividido em 33,96% de formação campestre e 36,70% de formação florestal (Souza et al, 2020). As áreas antropizada somam 7,31% sendo 9,20% de área urbana, 8,64% de mineração e 6,97% de mosaico de usos. O restante da área divide-se em 1,04% do território de água e 0,99% usos não significativos.



Mapa 5 Mapa de uso do solo. Fonte: Elaborado pela autora, 2024.

Segundo o trabalho de Machado (2021), o município de Nova Lima está enquadrado na unidade climática sub-regional do Clima das Serras do Quadrilátero Ferrífero, onde a precipitação média anual é de 1536,6 mm; a temperatura máxima de 24,5°C, média de 18,6°C e mínima de 12,7°C.

Essa unidade climática ainda é dividida pela autora em dois climas locais. Clima A1, localizado nos Patamares Elevados e Clima A2 localizado nos Patamares Rebaixados da região. O Clima A1 considera, quase sempre, altimetrias superiores à 1000m e uma precipitação anual acumulada entre 1531 e 1640 mm, considerando três meses secos. A temperatura média anual é entre 16,1°C e 18,1°C (MACHADO, 2021).

Por sua vez, o clima A2 considera as altimetrias entre 751 e 1050m, 1421 a 1530mm de precipitação anual acumulada e temperaturas médias entre 18,2°C e 20,2°C. Conforme Machado (2021) a diferença de altitude entre os dois climas locais é capaz de explicar as diferenças de temperatura e de pluviosidade.

Não existem estações meteorológicas convencionais controladas pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) no município de Nova Lima. Portanto, não existem normais climatológicas calculadas para esse município. Também não existe na rede disponibilizada pelo INMET estações automáticas no limite municipal. Assim sendo optou-se por utilizar os dados da estação automática do INMET localizada na Estação Ecológica de Cercadinho para a realização do diagnóstico climático. Trata-se da análise da série histórica de janeiro/2014 até junho/2023 dos dados meteorológicos dessa estação.

A média da precipitação anual acumulada no período analisado é de 1651mm. O Gráfico 1 apresenta o comportamento médio dessa variável ao longo do ano. Os meses de junho, julho e agosto são os de menor pluviosidade.

O padrão da pluviosidade é explicação pela atuação de diversos sistemas sinóticos, estáveis ou instáveis ao longo do ano. Machado (2021) destaca a Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS), da Zona de Convergência de Umidade (ZCOU), Frente Frias e Linhas de Instabilidade nos meses da primavera e verão e dos Anticiclone Polar do Atlântico Sul (APAS) e Anticiclone Subtropical do Atlântico Sul (ASAS) durante outono e inverno. Essa combinação resulta no típico padrão dos climas tropicais, onde há o inverno seco e verão chuvoso (Gráfico 1).

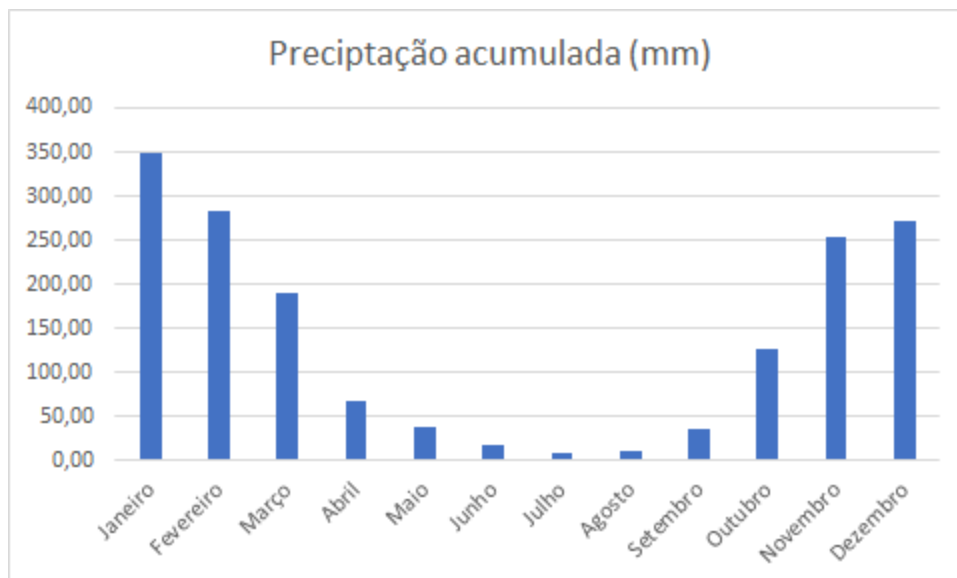


Gráfico 1 Precipitação acumulada série histórica 2014 a 2023 Estação Meteorológica do Cercadinho, Belo Horizonte/ MG. Fonte: INMET (2023)

É interessante pensar como os gráficos de pluviosidade e de pressão atmosférica (Gráfico 2) apresentam comportamentos complementares. Machado (2021) destaca a atuação dos anticiclones (ASAS e APAS) durante os meses de outono e inverno. Os anticiclones são pontos de alta pressão, e, no inverno do hemisfério sul, inibem a entrada de frentes. O aumento no valor médio pressão atmosférica durante os meses de outono e inverno pode ser observado na Gráfico 2

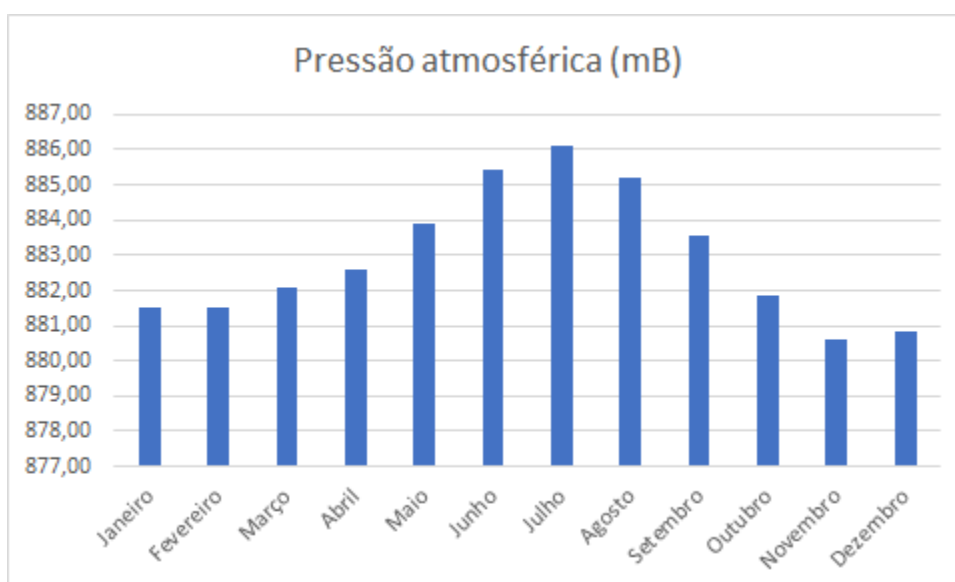


Gráfico 2 Pressão atmosférica - série histórica 2014 a 2023 Estação Meteorológica do Cercadinho, Belo Horizonte/ MG. Fonte: INMET (2023)

As temperaturas médias mensais variam de 12,98°C em julho à 28,10°C em janeiro. As médias de temperatura têm variação média de 4,73°C, conforme apresentado no Gráfico 3.

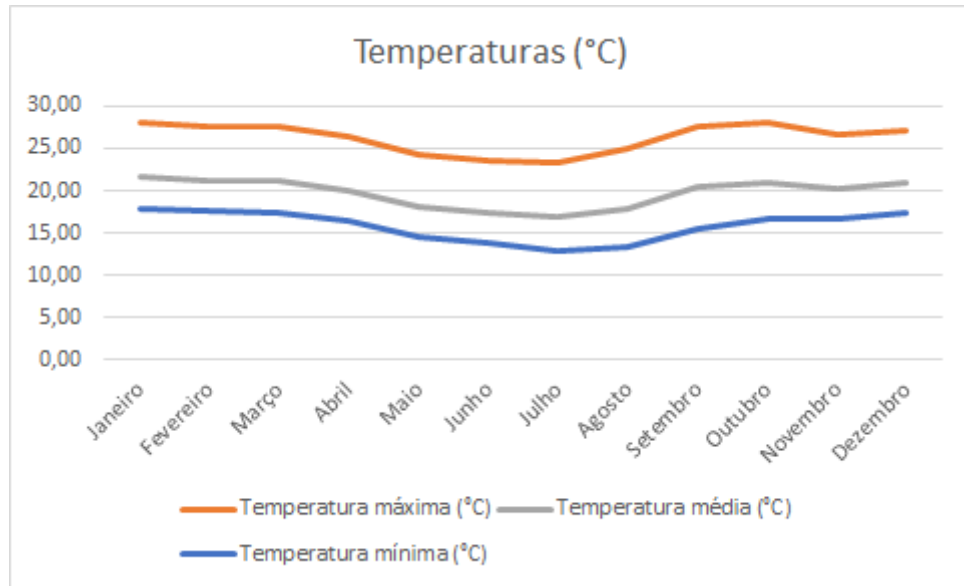


Gráfico 3 Temperaturas máximas, médias e mínimas - série histórica 2014 a 2023 Estação Meteorológica do Cercadinho, Belo Horizonte/ MG. Fonte: INMET (2023)

#### 4 MATERIAIS E MÉTODOS

Considerando o perigo a ocorrência de um evento físico, e tendo em vista o objetivo do trabalho em tela, é necessária a seleção de variáveis que levam a identificação dos lugares no município de Nova Lima vulneráveis à ocorrência de inundações.

A ocorrência de inundações está relacionada com a presença e distância de cursos d'água, a morfometria das vertentes e sua declividade, ao uso do solo da bacia hidrográfica e outros fatores que interferem na formação de escoamentos e em sua propagação ao longo da bacia (CAMPOS et al, 2015).

Com base nos trabalhos de Almouctar et al (2024), BELAZREG et al (2023), Dalfi et al (2013), Freiman e Carvalho (2020) Simões e Conceição (2020) e Marth, Moura, Koester (2016), dedicados à mapeamento de riscos de inundação, optou-se pelas seguintes variáveis: hipsometria, declividade, fluxo acumulado, uso do solo e precipitação.

A hipsometria foi obtida através do modelo digital de elevação (MDE) e identifica a altura absoluta de um ponto. Essa variável, conforme MIRANDA et al (2019), indica as condições mais favoráveis de escoamento das partes mais altas da paisagem e consequente acumulação hídrica nas partes mais baixas. O MDE utilizado foi o ALOS PALSAR, com resolução espacial de 12,5m disponibilizado na plataforma estadunidense Earth Data.

A declividade controla a velocidade com que acontece o escoamento superficial, permitindo maior ou menor infiltração de água. Em áreas de maior declividade, o fluxo tem velocidade maior. Já nas áreas de baixa declividade, o fluxo tem velocidade menor e tende a se acumular. A declividade é a relação diferença de altura entre dois pontos em uma vertente e a distância horizontal entre eles. É calculada em ambiente SIG a partir do MDE. Como foi derivada do MDE ALOS PALSAR, a declividade também tem resolução espacial de 12,5m.

O fluxo acumulado é outra variável utilizada nos modelos e demonstra a quantidade de pixels vizinhos que escoam para um pixel específico. Na paisagem pode ser interpretado não só pela identificação das áreas preferenciais de escoamento da drenagem, mas também o quanto de água drena por esse lugar.

É o resultado de uma modelagem que utiliza como entrada um modelo de direção de fluxos extraído do MDE (FILHO e CASTILHO, 2023). A Figura 2 auxilia na compreensão dessa variável.

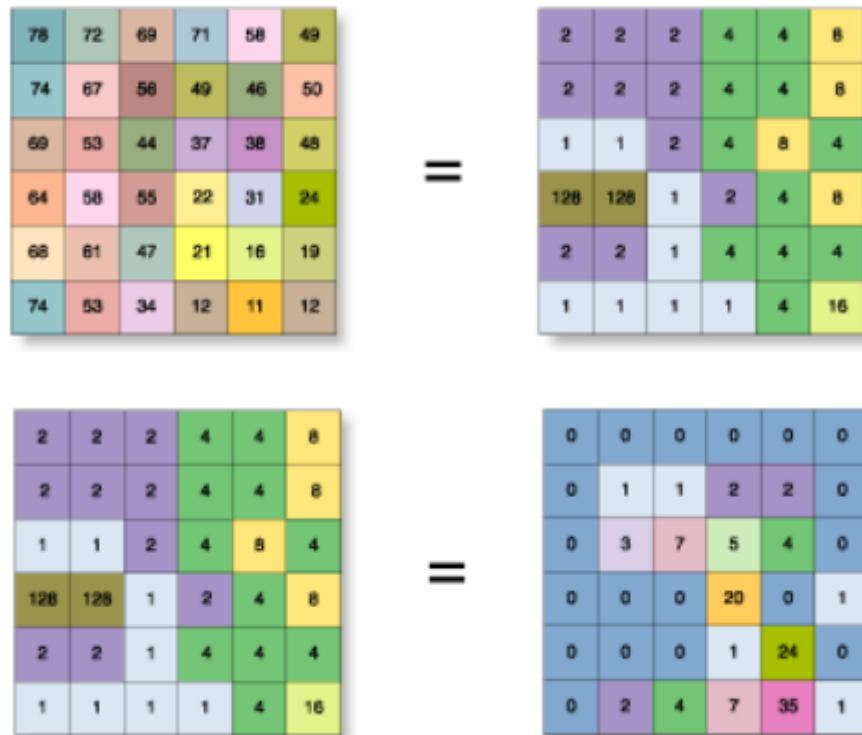


Figura 2 Modelagem do fluxo acumulado. Fonte: Flow Direction (Spatial Analyst)—ArcGIS Pro | Documentation”, [s.d.]

A primeira entrada é um exemplo de modelo digital de elevação. Podemos observar os valores da hipsometria entre 11 e 78 metros. Como primeira saída, a direção do fluxo que tem valores 1, 2, 4, 8, 16, 32, 64, 128, que representam de forma numérica a direção: leste, sudeste, sul, sudoeste, oeste, noroeste, norte e nordeste, respectivamente. Dessa forma, podemos interpretar para qual sentido escoar o fluxo de água que passa nesse pixel.

Por fim, a modelagem entre direção de fluxo e fluxo acumulado. O resultado na célula do raster de fluxo acumulado é um valor cumulativo determinado pelo somatório do peso de todas as células que convergem para cada célula no declive. Os pixels com maior valor de fluxo acumulado nos ajudam a identificar canais de rios ou outras áreas preferenciais para a acumulação de água (Figura 3).

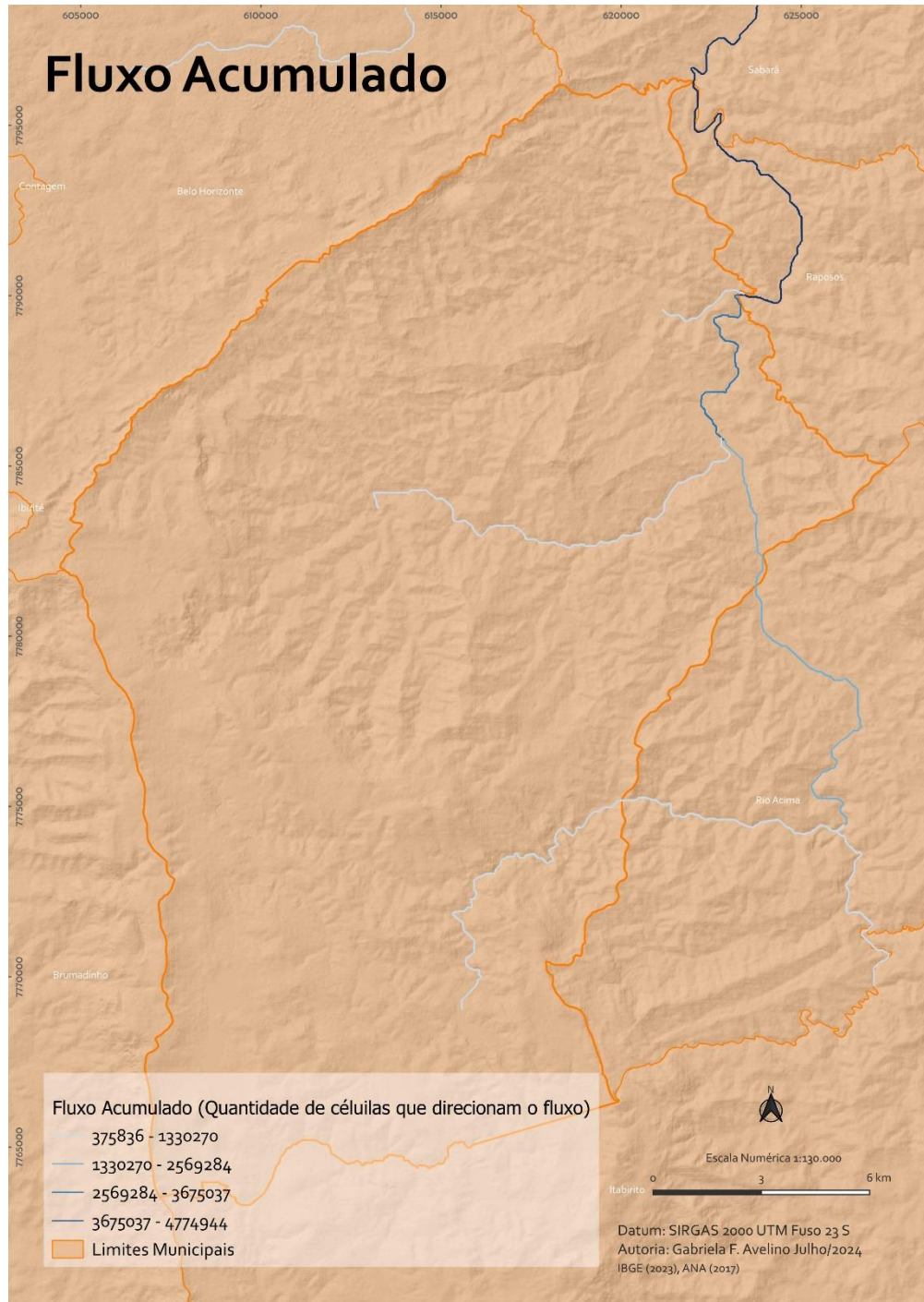


Figura 3 Detalhe do fluxo acumulado em Nova Lima. Fonte: Elaborado pela autora, 2024

O uso do solo, por sua vez, tem influência no potencial de infiltração das águas pluviais no solo. Áreas antropizadas e urbanizadas tendem a ter o solo impermeabilizado, impedindo a infiltração da água da chuva. Além do aumento do volume de água pluvial, a velocidade de escoamento dessas águas também aumenta. Dessa maneira, a água que infiltrava de maneira lenta pelo solo, agora demanda o escoamento por dutos e outras soluções de engenharia que nem sempre estão dimensionadas adequadamente (TUCCI,2001).

O dado de uso do solo utilizado nesse trabalho foi disponibilizado pelo Projeto MapBiomias (2022) que realiza o mapeamento anual do Uso e Cobertura da Terra no Brasil. Utilizou-se o uso do solo do ano de 2022 da Coleção 7 da Série Anual de Mapas de Uso e Cobertura da Terra do Brasil, ano mais recente disponível quando da elaboração deste trabalho. O raster disponibilizado tem resolução espacial de 30m.

Para os dados de precipitação projetada, optou-se pelo modelo climático MPI-ESM1.2-HR (GUTJAHR et al., 2019) para o período de 2021 a 2040. Martins et.al (2019) avaliaram 50 modelos climáticos globais disponíveis *Coupled Model Intercomparison Project Phase 6* (CMIP6) visando selecionar aqueles que melhor simulam o clima da América do Sul, tendo como base o período histórico 1995 a 2014.

O modelo MPI-ESM1.2-HR se mostrou o mais adequado para o subdomínio do sudeste do Brasil. O cenário utilizado foi o ssp585. O modelo passou por um processo de *downscaling* e foi disponibilizado pela plataforma *WorldClim* em resolução espacial de 1km.

#### 4.1 Processamento digital de imagens

Todos os arquivos referentes às variáveis passaram por diversas etapas antes da elaboração dos modelos. A primeira etapa é a de adequação dos rasters à área de estudo – Recortar/*clip*. Tendo em vista que o arquivo *raster* de precipitação tem a resolução espacial muito grande (1km), um *buffer* de 2km do município foi utilizado para recortar as imagens, assim existiria a garantia de que toda a área do município seria coberta por todos os arquivos.

Após o recorte, todos os arquivos foram reprojatados para o datum SIRGAS 2000 fuso 23, EPSG 31983.

O *raster* de precipitação projetada disponibilizado pela plataforma *WorldClim* é um arquivo composto de 12 bandas, cada uma com a projeção média mensal para o período de 2021 a 2040. Optou-se por trabalhar com o maior valor de média mensal, considerando que esse será o pior cenário de precipitação a ser enfrentado. Nesse caso, o mês de dezembro apresenta a maior média mensal projetada. A banda 12 foi extraída através da calculadora *raster* do QGIS 3.10 (2019) e passa a ser o dado de pluviosidade considerado.

Para que o modelo digital de elevação possa ser utilizado para a extração da declividade e do fluxo acumulado, o mesmo deve ser processado para a criação de um Modelo Digital de Elevação Hidrológicamente Consistente – MDEHC. Chaves (2002) aponta que o MDEHC é a base para qualquer estudo de ordem hidrológica, pois representa o relevo de forma fidedigna e assegura a convergência do escoamento superficial. O algoritmo “*Fill Sink*” desenvolvido por Wang e Liu (2006) realiza o preenchimento de vazios espúrios no MDE. Esses vazios espúrios são “falsas depressões” que não existem no terreno e levariam a uma interpretação hidrológica incorreta.

A variável de uso do solo foi reclassificada de acordo com a suscetibilidade de cada classe de uso do solo. O Quadro 2 traz a ponderação realizada por especialista de acordo com a permeabilidade do uso do solo, que foi aplicada nessa pesquisa. As notas variam de 1 a 5, sendo 5 as classes de uso de solo com maior vulnerabilidade à inundação.

Quadro 2 Suscetibilidade à inundação das classes de uso do solo. Fonte: Elaborado pela autora, 2024.

<b>Código no MapBiomass</b>	<b>Uso do Solo</b>	<b>Vulnerabilidade</b>
3	Formação Florestal	1
4	Savana	1
12	Campo	2
15	Pastagem	2
21	Mosaico de Usos	2
24	Área urbana	4
25	Outras áreas não vegetadas	3
29	Afloramento rochoso	4
30	Mineração	4
33	Água	5

A etapa seguinte foi a de normalização, no QGIS (2019), através da ferramenta *raster calculator*, para que tenham a mesma ordem de grandeza, 0 a 1. Por meio do *z-score*, os dados terão média igual a zero e desvio padrão igual a 1. Foi aplicada a fórmula:

$$(x - \min) / (\max - \min)$$

Corseuil (2006) destaca a importância da normalização dos valores atribuídos às variáveis, em uma análise multicritério, para que o cruzamento seja possível dentro de uma escala de valores comum. Pinto (2015) complementa que para além das diferenças na escala de valores, a incompatibilidade entre os valores das variáveis pode ocorrer por se tratar de unidades

de medidas diferentes. Por exemplo, um critério ser medido em hectares e outro em unidade monetária.

Os *rasters* de declividade e hipsometria tiveram seus valores invertidos. Na ferramenta de *raster calculator* foram multiplicados por  $-1$ , e então sua escala passou a ser de 0 a  $-1$ . Isso é importante pois, ao contrário de todas as outras variáveis, declividade e hipsometria são inversamente proporcionais à vulnerabilidade à inundação. Quanto menor a declividade ou menor a hipsometria, maior a vulnerabilidade à inundação

Os cinco arquivos de entrada foram submetidos à ferramenta “Alinhamento de *raster*” no QGIS (2019). Essa ferramenta é interessante porque ajusta a grade dos *raster* de entrada para que os *pixels* sejam coincidentes. Isso significa que as coordenadas dos quatro cantos de cada *pixel* será a mesma para todos os *rasters*, além disso, todos os arquivos passam a ter o mesmo número de linhas e colunas, resultando na mesma quantidade de *pixels* (que, nesse contexto, podem ser entendidas como amostras). Naturalmente, isso só é possível se os *pixels* tiverem o mesmo tamanho. Desse modo, a ferramenta realiza a reamostragem no tamanho das células e o deslocamento da grade dos *rasters*. As células dos *rasters* foram ajustadas para 30 m de resolução.

A Figura 4 apresenta as variáveis após a etapa de processamento de imagens.

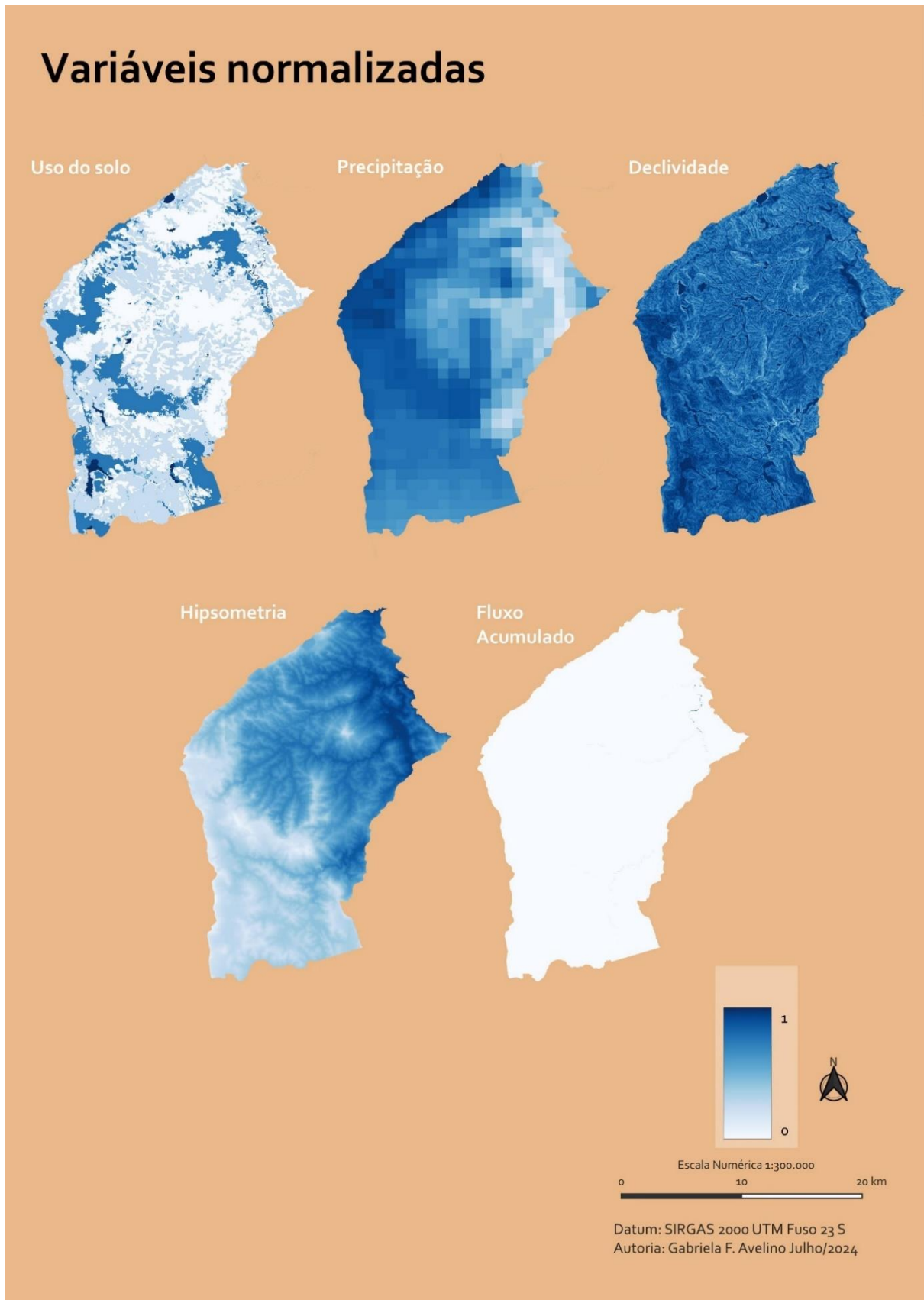


Figura 4 Variáveis normalizadas e pós etapa de processamento de imagens. Fonte: Elaborado pela autora, 2024.

#### 4.2 Análise multicritério em ambiente de sistema de informação geográfica

Análises multicritério são definidas por Greene et al (2011) como uma coleção de abordagens formais que procuram levar em conta os fatores-chaves, ajudando indivíduos ou grupos de pessoas na tomada de decisão de forma explícita e transparente. As abordagens, em geral, utilizam regras pré-definidas e podem agregar, avaliar ou classificar as alternativas de solução.

As análises de problemas espaciais geralmente contemplam um grande volume de variáveis. A análise multicritério (AMC) para tomada de decisão (do inglês: *Multicriteria decision analysis* – MCDA) provê uma vasta gama de técnicas e instrumentos para estruturar o desenho, avaliação e a priorização de alternativas de solução desse problema espacial (MALCZEWSKI, 2006).

A análise multicritério, em ambiente de sistema de informação geográfica (SIG), é uma metodologia de análise espacial baseada no cruzamento de planos de informação. Tem como objetivo o desenvolvimento de estudos que caracterizam a realidade vigente e preditores de situações futuras com base nas variáveis que interferem em determinados processos (MOURA, 2007; CORSEUIL, 2006; PINTO, 2015)

Pinto (2015) ressalta que a integração entre SIG e análises multicritérios proporciona inúmeros benefícios para a resolução de problemas de planejamento e gerenciamento no mundo real.

Conforme Moura (2007), o processo de análise multicritérios é muito utilizado em geoprocessamento, pois tem como base a mesma lógica de um SIG: i) seleção das principais variáveis que descrevem o fenômeno através de um recorte metodológico; ii) representação da realidade segundo diferentes variáveis, em forma de camada de informação; iii) discretização dos planos de análise em resoluções espaciais adequadas para o fenômeno em análise, bem como para as fontes dos dados; iv) combinação das camadas de variáveis; e v) a possibilidade de validação e calibração do sistema, através da identificação e correção das relações construídas entre as variáveis mapeadas.

Para Moura (2007) é possível que os planos de informação estejam em formato vetorial ou matricial (raster), mas que a tendência é pela adoção do sistema matricial, pois é uma condição obrigatória para alguns modelos. No caso dos arquivos raster, a definição da resolução

é pela escolha do tamanho do pixel daquele arquivo. Ainda para a autora, a escolha da unidade territorial de integração das análises é importante e isso implica na escolha da definição espacial dos planos de informação.

Moura e Jankowski (2016) relatam que o modelo multicritério pode ser traduzido em uma álgebra de mapas, favorecendo a subdivisão do problema em análise em: as variáveis que interferem no fenômeno, a maneira com que eles são integrados e como se combinam.

A indicação dos pesos escolhidos para cada variável em função dos objetivos da análise é uma etapa importante na análise multicritério (MOURA e JANKOWSKI, 2016). Para os autores existem muitas maneiras de definição para os pesos, mas podem ser divididos em dois grandes grupos: “*data driven evaluation*” que são os que se baseiam em mineração de dados e buscam identificar tendências de hierarquia das variáveis, como ACP, e “*knowledge driven*” que buscam estudos guiados por especialistas, como método Delphi e a Análise hierárquica de processos.

Conforme MALCZEWSKI (2006), uma das grandes vantagens em se usar métodos de tomada de decisão multicritério em análises GIS é que os tomadores de decisão podem inserir valores de julgamentos e receber os retornos desses pesos para análise proposta. Em alguns casos, isso permite que a análise seja refeita e novos cenários sejam testados.

A atribuição de pesos para as variáveis é uma etapa chave para a análise multicritério. Os pesos têm a função de quantificar a relevância da variável e podem influenciar fortemente nos resultados da análise multicritério. Silva (2018) destaca que esse o processo de definição de pesos geralmente é complexo. Diversos métodos podem ser empregados nesse passo, sua escolha é baseada em fundamentação teórica e em recursos tecnológicos disponíveis. (NÉMETH et al, 2018).

O método mais simples de definição de pesos é a classificação direta, que é realizada através da resposta de tomadores de decisão, especialistas ou pessoas interessadas que, de maneira simples atribuem valores aos diferentes critérios (NÉMETH et al, 2018). Essa técnica pode ser chamada em inglês de SMART, sigla para *simple multiattribute rating technique*, em português: técnica simples de classificação multiatributo (WU, 2022).

Os métodos subjetivos de atribuição de pesos apresentam duas grandes limitações para Wu e Wang (2022), a falha humana no julgamento dos valores, imprecisões e incertezas, o que

umentaria o nível de incerteza e a possibilidade da necessidade de realizar muitas comparações, no caso de um modelo complexo.

Nos métodos objetivos de atribuição de pesos, o valor definido é derivado da informação de cada uma das variáveis através de modelos matemáticos (ODU, 2019). O que pode ser útil nas situações em que não se pode consultar uma pessoa ou os julgamentos de diversos especialistas/agentes interessados seja inconsistente.

A partir desse ponto, a metodologia para os dois modelos passa a ser diferente. Primeiro será exposta a metodologia do modelo de análise multicritério ponderada por especialistas (AMC-E) e posteriormente a análise multicritério determinada pela análise de componentes principais (AMC-ACP).

#### 4.2.1.1 Análise multicritério ponderada por especialistas (AMC-E)

Com base no conhecimento de especialistas, bem como na vasta bibliografia a respeito do mapeamento de vulnerabilidade e suscetibilidade à inundação, os pesos foram atribuídos conforme Quadro 3.

Quadro 3 Suscetibilidade à inundação das classes de uso do solo. Fonte: Elaborado pela autora, 2024.

Variável	Peso
Fluxo Acumulado	10%
Hipsometria	25%
Precipitação	20%
Declividade	30%
Uso do Solo	15%

Desse modo, foi aplicada a seguinte equação para o cálculo do modelo AMC-E

$$(\text{Fluxo Acumulado} \cdot 0,1) + (\text{Hipsometria} \cdot 0,25) + (\text{Precipitação} \cdot 0,2) \\ + (\text{Declividade} \cdot 0,3) + (\text{Uso do Solo} \cdot 0,15)$$

Equação 1 Fórmula aplicada para cálculo da AMC-E

#### 4.2.1.2 Análise Multicritério definida pela Análise fatorial por Componentes Principais (AMC-ACP)

#### 4.2.1.2.1 Análise de componentes principais

Há problemas de pesquisa comuns nas ciências sociais que requerem a mensuração de fenômenos não diretamente observáveis (FIGUEIREDO FILHO e SILVA JÚNIOR, 2010). Matos e Rodrigues (2019) referem-se a esses fenômenos como variáveis latentes ou construtos. Segundo esses autores, um dos grandes desafios para os pesquisadores é encontrar variáveis empiricamente observáveis que possam ser racionalmente transformadas em conceitos abstratos.

Figueiredo Filho e Silva Júnior (2010) identificam duas formas principais de mensurar essas variáveis não observáveis empiricamente: o uso de variáveis proxy ou a redução de um conjunto de variáveis a poucas dimensões por meio da análise fatorial. Embora a primeira alternativa seja mais simples, pode ser arriscada, pois nem sempre é possível encontrar uma variável proxy adequada.

Por outro lado, a análise fatorial é um método estatístico abrangente, adequado para definir e medir a organização estrutural de um sistema de interesse (KAPLUNOVSKY, "s.d."). Conforme Hair et al. (2005), a análise fatorial examina as relações entre um grande número de variáveis e procura explicá-las em termos de suas dimensões comuns, os fatores. A independência é um elemento crucial que diferencia a análise fatorial da regressão, pois, na análise fatorial, todas as variáveis são consideradas simultaneamente (MATOS e RODRIGUES, 2019), enquanto na regressão há uma variável dependente e outras independentes.

De acordo com Figueiredo Filho e Silva Júnior (2010), a análise fatorial baseia-se no pressuposto de que alguns fatores subjacentes, em menor número que as variáveis observadas, são responsáveis pela covariação entre essas variáveis.

Hair et al. (2005) definem o fator como uma representação das dimensões latentes ou construtos que podem sintetizar o conjunto de variáveis originais observadas. Eles também o definem como uma combinação linear das variáveis originais.

As análises fatoriais evoluíram em duas direções metodológicas: análise fatorial exploratória e confirmatória. A análise exploratória visa revelar a estrutura subjacente de um conjunto de variáveis (KAPLUNOVSKY, "s.d."), seja reduzindo o número de variáveis ou identificando fatores (FÁVERO e BELFIORE, 2017), como é o caso deste trabalho. A análise

confirmatória permite ao pesquisador testar hipóteses e determinar em que medida certas variáveis representam um conceito ou dimensão (FIGUEIREDO FILHO e SILVA JÚNIOR, 2010).

Fávero e Belfiore (2017) identificam quatro objetivos principais para a análise fatorial: 1) redução estrutural; 2) validação de constructos; 3) elaboração de rankings de desempenho de fatores; 4) extração de fatores ortogonais para uso em técnicas multivariadas.

Figueiredo Filho e Silva Júnior (2010) delineiam os requisitos necessários para uma análise fatorial, que incluem a adequabilidade da amostra e o método de extração. A análise fatorial é geralmente utilizada com variáveis contínuas e não categóricas. O tamanho mínimo da amostra deve ser de 50 observações, e Hair et al. (2005) recomendam uma proporção de 5 observações por variável.

Entre os métodos de extração, a análise de componentes principais e o modelo de fator comum são os mais utilizados. O primeiro método é mais adequado para a análise fatorial exploratória, enquanto o segundo é mais apropriado para a análise fatorial confirmatória (HAIR et al., 2005).

#### 4.2.1.2.2 Determinação de pesos via Análise fatorial por Componentes Principais

Os pesos são obtidos via análise fatorial com a utilização dos escores fatoriais. Esses, conforme Matos e Rodrigues (2019) permitem que o valor de cada fator seja calculado para cada uma das observações da amostra.

Para Fávero e Belfiore (2017) os escores fatoriais são os parâmetros de um modelo linear que relaciona determinado fator com as variáveis originais. O cálculo dos escores é realizado, para cada amostra, a partir da determinação dos autovalores e autovetores. Um detalhe importante é que os escores de cada fator corresponde aos parâmetros estimados em um modelo de regressão linear múltipla.

O método da regressão considera as variáveis de entrada da análise de componentes principais como variáveis explicativas e os escores como variável dependente. Ou seja, a regressão calcula os valores de b considerando as correlações entre as variáveis iniciais (MATOS e RODRIGUES, 2019). O peso de cada variável para a análise multicritério será então

os coeficientes desse modelo. Os coeficientes são o resultado da multiplicação da matriz de cargas fatoriais pelo inverso da matriz de correlações (matriz R). Para Matos e Rodrigues (2019), os coeficientes representam uma medida mais pura da relação entre fator e variável.

Para que o cálculo dos escores fosse possível, os arquivos raster foram convertidos em pontos através da ferramenta “Pixels de raster para pontos” e utilizou-se a ferramenta “JoinAttributesbyLocation” para juntar os valores de todas as camadas de pontos em uma só. Essa ferramenta une, na tabela de atributos de uma camada de entrada, os atributos da feição que sobrepõe à feição da camada de entrada. Isso só foi possível pelo alinhamento dos raster realizado na etapa anterior que garantiu que o centroide de cada pixel de cada raster fosse o mesmo.

Dessa maneira, agora existe uma tabela de atributos contendo o valor de cada variável de interesse para cada amostra (pixel). Essa tabela foi inserida no software estatístico IBM SPSS e a análise fatorial por componente principal realizada. Importante destacar que para que os escores sejam calculados conforme o exposto anteriormente, foi selecionada, em pontuações, a opção regressão e a exibição da matriz de coeficiente da pontuação.

Os escores calculados são apresentados na Figura 5:

	Component	
	1	2
fluxoacc	-,155	-,070
dem	3,151E-01 9	-,070
pluv	,328	,586
slope	1,396E-01 9	-,060
uso	,100	,621

Extraction Method: Principal

Component Analysis.

Component Scores.

Figura 5 Escores calculados via análise fatorial por componente principal. Fonte: Elaborado pela autora, 2024

Dessa forma, a fórmula aplicada na álgebra de mapas foi a seguinte:

$$("Fluxo\ Acumulado" * -0.000000144925) + ("Hipsometria" * 0.000000108201) + ("Pluviosidade" * 0.327756216850) + ("Declividade" * -0.000000033082) + ("Uso\ do\ solo" * 0.100425813951)$$

Equação 2 Fórmula aplicada para cálculo da AMC-ACP

A Figura 6 traz o fluxograma da metodologia empregada nesse trabalho.

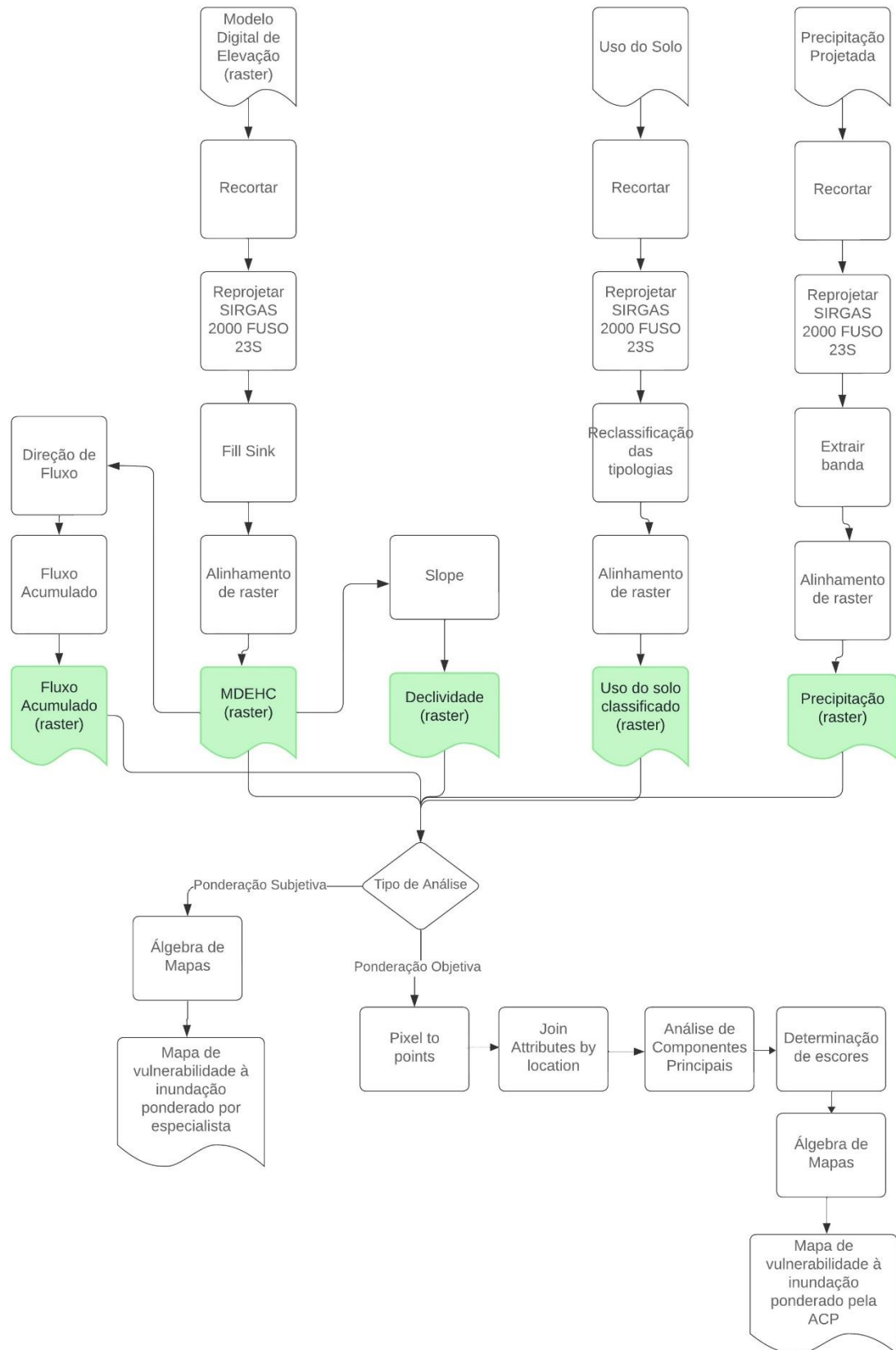


Figura 6 Fluxograma do processo metodológico. Fonte: Elaborado pela autora, 2024.

### 4.3 Verificação da acurácia dos modelos

A acurácia dos modelos de vulnerabilidade à inundação projetada será verificada através da comparação desses modelos com pontos de ocorrência conhecidos de inundação no município de Nova Lima.

Acurácia deve ser entendida como um conceito estatístico que representa a semelhança ou probabilidade que um grupo particular de medidas tem com a realidade. No caso de um mapeamento, trata-se da espacialização de uma classe em relação à realidade. (Bernardes (2006)

A acurácia será verificada através da ferramenta raster value to points. Essa ferramenta copia para a tabela de atributos dos pontos o valor do pixel que faz interseção com o ponto de interesse. São 19 pontos conhecidos com histórico de inundação que serão comparados com os 19 pixels em que fazem interseção em cada um dos modelos.

O acerto é a ocorrência de inundação onde os modelos indicam vulnerabilidade alta ou muito alta, ou seja, valores superiores à 0,6 serão considerados como positivo. Como proposto por Bernardes (2006) buscou-se uma medida de quão próximos os valores obtidos estão dos valores considerados verdadeiros. Em contrapartida, podem ocorrer situações de erro, que são os lugares em que o modelo não indica alta/muita alta vulnerabilidade, mas já aconteceram inundações.

Como descrito por Ribeiro Júnior (2017) a Tabela de Contingência permitirá a comparação entre os valores observados (ocorrência ou não) e os valores modelados. A partir da tabela de contingência, é possível calcular o índice crítico de sucesso, que é o número de acertos dividido pelo número de amostras observadas. É representado em percentual e quanto mais próximo de 100%, melhor o ICS do modelo.

Pode ser representado pela seguinte equação:

$$ICS = \text{acertos}/n$$

A adoção do ICS converge com o proposto por Bernardes (2006) pois para o autor, a determinação de exatidão deve ser expressa por um índice simples, de fácil interpretação e que seja capaz de determinar as performances relativas de cada modelo.

A localização dos pontos foi obtida através dos trabalhos de Sete Soluções e Tecnologia Ambiental Ltda (2021) e Ramos et al. (2018), os pontos são apresentados no Mapa 6 e no Quadro 4.

Quadro 4 Pontos conhecidos de inundação em Nova Lima. Fonte: Elaborado pela autora, 2024.

Ponto	E	N	Data	Local	Fonte do trabalho	Referência
1	620689	7789455	11/15/2012	Avenida José Bernardo de Barros	Jornal O Tempo	RAMOS et al., 2018
2	620161	7789501	12/11/2017	Banqueta do Rego Grande	Site Sempre Nova Lima	RAMOS et al., 2018
3	615377	7788227	2/21/2018	MG-030	Morador local	RAMOS et al., 2018
4	620498	7788988	2/21/2018	Avenida José Bernardo de Barros	TV Banqueta	RAMOS et al., 2018
5	619615	7788702	2/21/2018	Rua Lauro Magalhães Santeiro	TV Banqueta	RAMOS et al., 2018
6	619682	7788636	2/21/2018	Rua Curitiba	TV Banqueta	RAMOS et al., 2018
7	622836	7785537	12/20/2012	Rua Éden, Bairro Honório Bicalho	Morador local	RAMOS et al., 2018
8	620624	7789571	2/11/2017	Rua Benedito Valadares	Clima-tempo	RAMOS et al., 2018
9	622408	7785615	1/3/2017	Bairro Honório Bicalho	Morador local	RAMOS et al., 2018
10	620289	7790588	1/2/2012	Bairro Honório Bicalho	Morador local	RAMOS et al., 2018
11	620170	7788440	11/15/2012	Bairro Honório Bicalho	Morador local	RAMOS et al., 2018
12	615340	7788208	N/A	Rodovia MG-030 (Ponto Verde – Shopping de Conveniência e Loteamento Residencial Rossi – Botanique)	Plano Municipal de Saneamento Básico de Nova Lima	Sete Soluções Ambientais (2022)

14	617154	7788609	N/A	MG-030 (Trevo da Máquina)	Plano Municipal de Saneamento Básico de Nova Lima	Sete Soluções Ambientais (2022)
15	620157	7788947	N/A	Rua Albertina Lopes	Plano Municipal de Saneamento Básico de Nova Lima	Sete Soluções Ambientais (2022)
16	619680	7788642	N/A	Chácara dos Cristais (próximo ao Colégio Polivalente)	Plano Municipal de Saneamento Básico de Nova Lima	Sete Soluções Ambientais (2022)
17	620059	7788771	N/A	Rua Bauxita, ao lado da sede do Morro Velho Esporte Clube, bairro Cristais	Plano Municipal de Saneamento Básico de Nova Lima	Sete Soluções Ambientais (2022)
18	621066	7789311	N/A	rua Rio de Janeiro, bairro Matadouro	Plano Municipal de Saneamento Básico de Nova Lima	Sete Soluções Ambientais (2022)
19	621509	7787699	N/A	Rua José de Oliveira	Plano Municipal de Saneamento Básico de Nova Lima	Sete Soluções Ambientais (2022)
20	623712	7783306	N/A	rua 7, bairro Santa Rita	Plano Municipal de Saneamento Básico de Nova Lima	Sete Soluções Ambientais (2022)



Mapa 6 Pontos conhecidos com histórico de inunda o em Nova Lima. Fonte: Elaborado pela autora, 2024.

#### 4.4 Análise exploratória de dados do modelo

A análise de dados espaciais se propõe a investigar a distribuição de variáveis em diferentes regiões geográficas. A análise exploratória de dados espaciais (AEDE) é uma técnica específica que facilita a visualização dessa distribuição espacial.

Para realizar a AEDE, são utilizadas ferramentas gráficas como mapas temáticos e diagramas de dispersão, que ajudam a identificar padrões espaciais nos dados. Krempi (2004) afirma que a AEDE é eficaz para descrever e visualizar distribuições espaciais, identificar situações atípicas (outliers), descobrir padrões, clusters de valores semelhantes e sugerir regimes espaciais ou outras formas de heterogeneidade.

A autocorrelação espacial é um elemento essencial na análise espacial e refere-se à interdependência espacial entre observações de uma variável em diferentes locais geográficos. Anselin (1995) explica que, quando uma variável em uma localização é afetada pelo valor dessa mesma variável em outras localizações, ocorre autocorrelação espacial.

Existem diversos métodos para analisar a autocorrelação espacial. Anselin (1995) distingue entre indicadores globais e locais de associação espacial e separa as estatísticas baseadas em vizinhança das baseadas em distância. O índice de Moran (I) é um dos indicadores mais utilizados para medir a autocorrelação.

O índice de Moran (I) avalia a relação entre um polígono específico e seus vizinhos com base em uma distância definida, utilizando a covariância entre eles para examinar a homogeneidade ou diversidade dos dados (LUZARDO, FILHO e RUBIM, 2017). O valor do índice varia de -1 a +1, onde valores próximos a +1 indicam forte autocorrelação espacial positiva, valores próximos a -1 indicam forte autocorrelação espacial negativa e valores próximos a 0 indicam ausência de autocorrelação espacial.

A estatística LISA (Local Indicator of Spatial Association) é usada para realizar a análise de autocorrelação espacial local. O mapa de agrupamento LISA (Indicadores locais de associação espacial) apresenta as associações espaciais do modelo AMC-E. São quatro categorias de agrupamento:

- Alto-Alto: Regiões onde altos valores estão cercados por altos valores. Significa que existe um agrupamento significativo de valores altos.

- Baixo-Baixo: Regiões onde baixos valores estão cercados por baixos valores. Significa que existe um agrupamento significativo de valores baixos.
- Alto-Baixo: Regiões onde altos valores estão cercados por baixos valores. Indicativo de outliers altos.
- Baixo-Alto: Regiões onde baixos valores estão cercados por altos valores. Indicativo de outliers baixos.
- Áreas Não Significativas: Regiões onde os valores não são significativamente diferentes do padrão aleatório.

Os agrupamentos do tipo alto-alto e baixo-baixo indicam a presença significativa de altos valores (ou baixo valores), o que sugere que nessas regiões as características são semelhantes ou estão sujeitas a fatores comuns que levam a altos valores (ou baixo valores).

O agrupamento alto- baixo mostra onde um alto valor está rodeado por valores baixos e o agrupamento baixo-alto demonstra o oposto, um valor baixo rodeado de valores altos. Esses agrupamentos podem apontar áreas de investigação futura para identificação de possível anomalia.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 5.1 Precipitação projetada pelo modelo climático MPI-ESM1.2-HR

O modelo climático MPI-ESM1.2-HR traz a precipitação média mensal projetada para o período de 2021 a 2040, conforme o SSP5-8 que considera 50% de probabilidade da ocorrência de um aumento de pelo menos 4°C na temperatura da superfície da Terra.

A Figura 8 apresenta a distribuição espacial desse volume de chuva no município de Nova Lima, além de apresentar a variação ao longo dos meses.

Para que fosse possível a comparação com as normais climatológicas, considerou-se o maior valor de precipitação para cada mês (Gráfico 4). Cabe lembrar que não existem normais climatológicas para o município de Nova Lima, desse modo, utilizou-se as normais disponibilizadas para a estação meteorológica do Cercadinho, em Belo Horizonte.

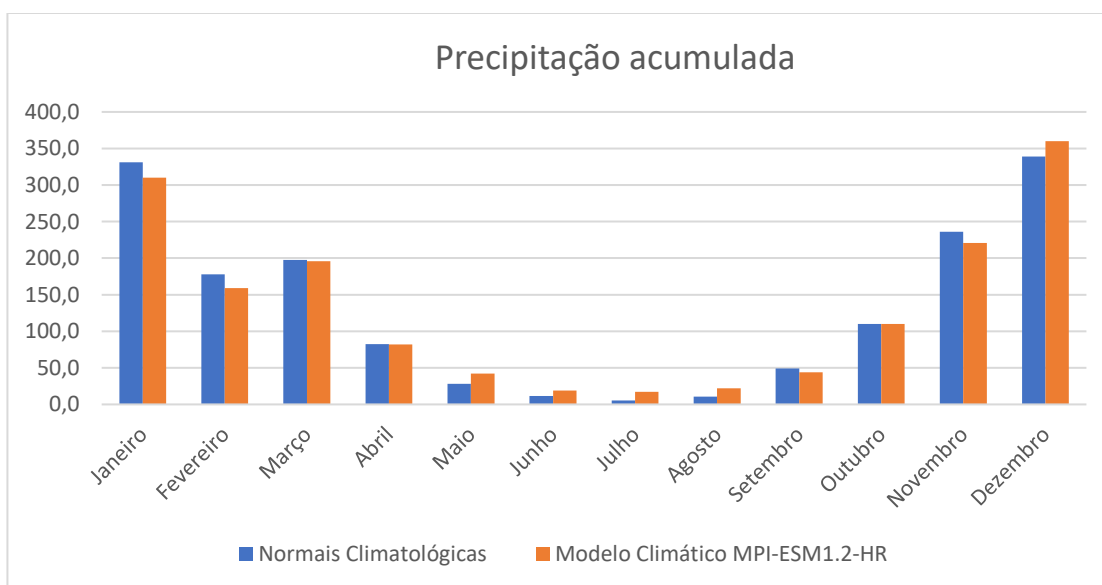


Gráfico 4 Comparação da precipitação mensal acumulada entre dados das Normais Climatológicas (INMET, 2024) e do Modelo Climático MPI-ESM1.2-HR. Fonte: Elaborado pela autora, 2024

Para essa comparação, calculou-se as seguintes estatísticas básicas: média mensal, diferença da média, e um teste T pareado. A média dos meses das Normais Climatológicas é 130,15, enquanto o valor de média do modelo climático MPI-ESM1.2-HR é 130,17. Resultando em uma diferença de 0,02.

O valor acumulado anual da precipitação também é muito semelhante. O acumulado anual das Normais Climatológicas é de 1578,3, o modelo climático MPI-ESM1.2-HR por sua vez, tem acumulado anual de 1582,0. Machado (2021) traz que a precipitação acumulada na unidade climática sub-regional do Clima das Serras do Quadrilátero Ferrífero é de 1536,6 mm.

O teste t pareado, conforme Capp e Nienov (2020), avalia se as médias de duas medidas são estatisticamente diferentes umas das outras. Em um teste t pareado, a hipótese nula é de que a média das diferenças entre as medidas é igual a zero, ou seja, não há diferença entre as medidas.

O p-valor do teste teve resultado superior a alfa (0,05) (Figura 7) nesse caso, aceitamos a hipótese nula e é possível dizer que não há diferença significativa entre as médias acumuladas de precipitação computadas pelas Normais Climatológicas e os valores projetados pelo modelo climático MPI-ESM1.2-HR.

		Paired Differences					t	df	Sig. (2-tailed)
		Mean	Std. Deviation	Std. Error Mean	95% Confidence Interval of the Difference				
					Lower	Upper			
Pair 1	Normais Climatológicas - Modelo Climático MPI-ESM1.2-HR	-,3083	13,4572	3,8847	-8,8586	8,2419	-,079	11	,938

Figura 7 Saída do software SPSS com o resultado do teste t pareado. Fonte: Elaborado pela autora, 2024

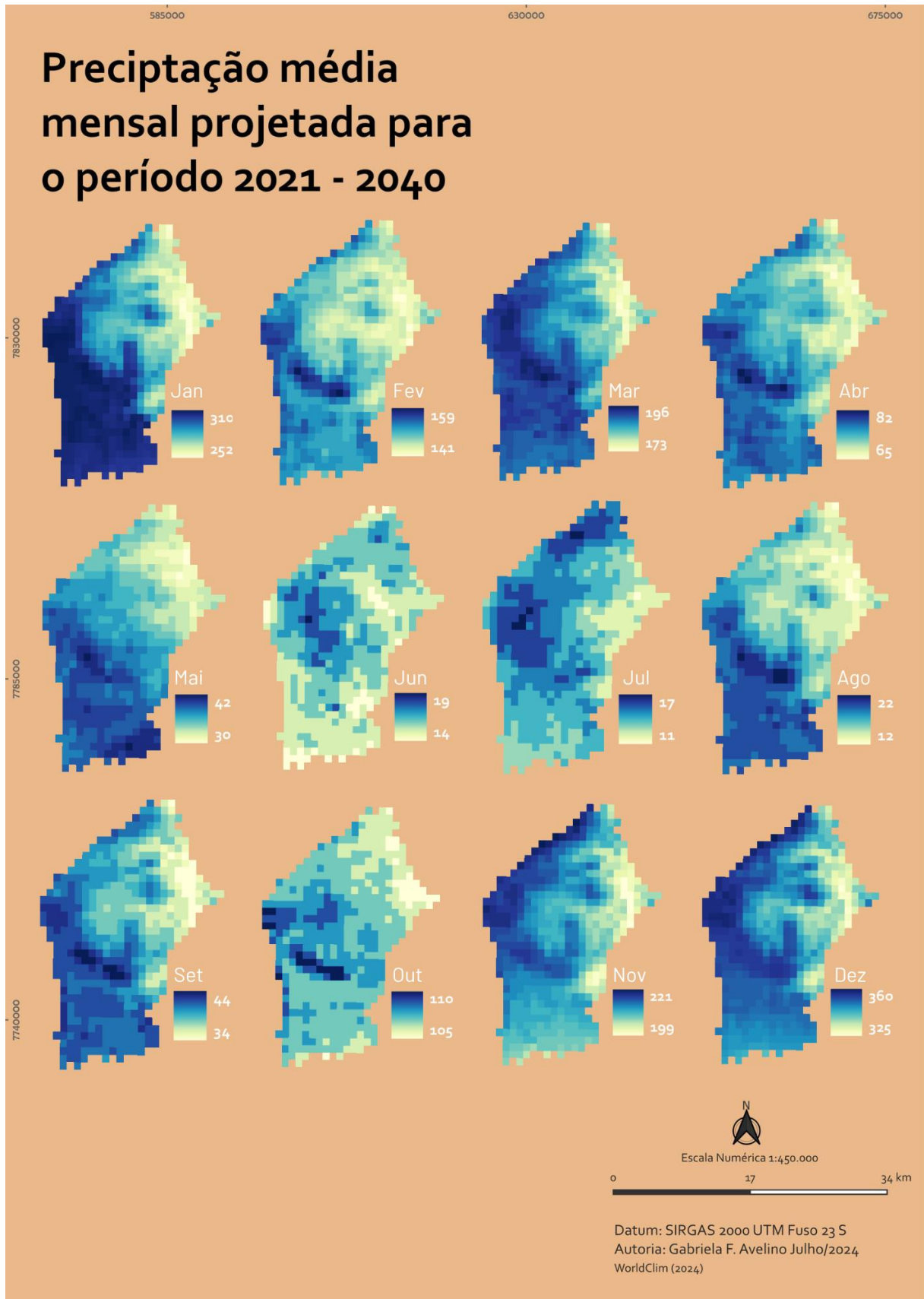
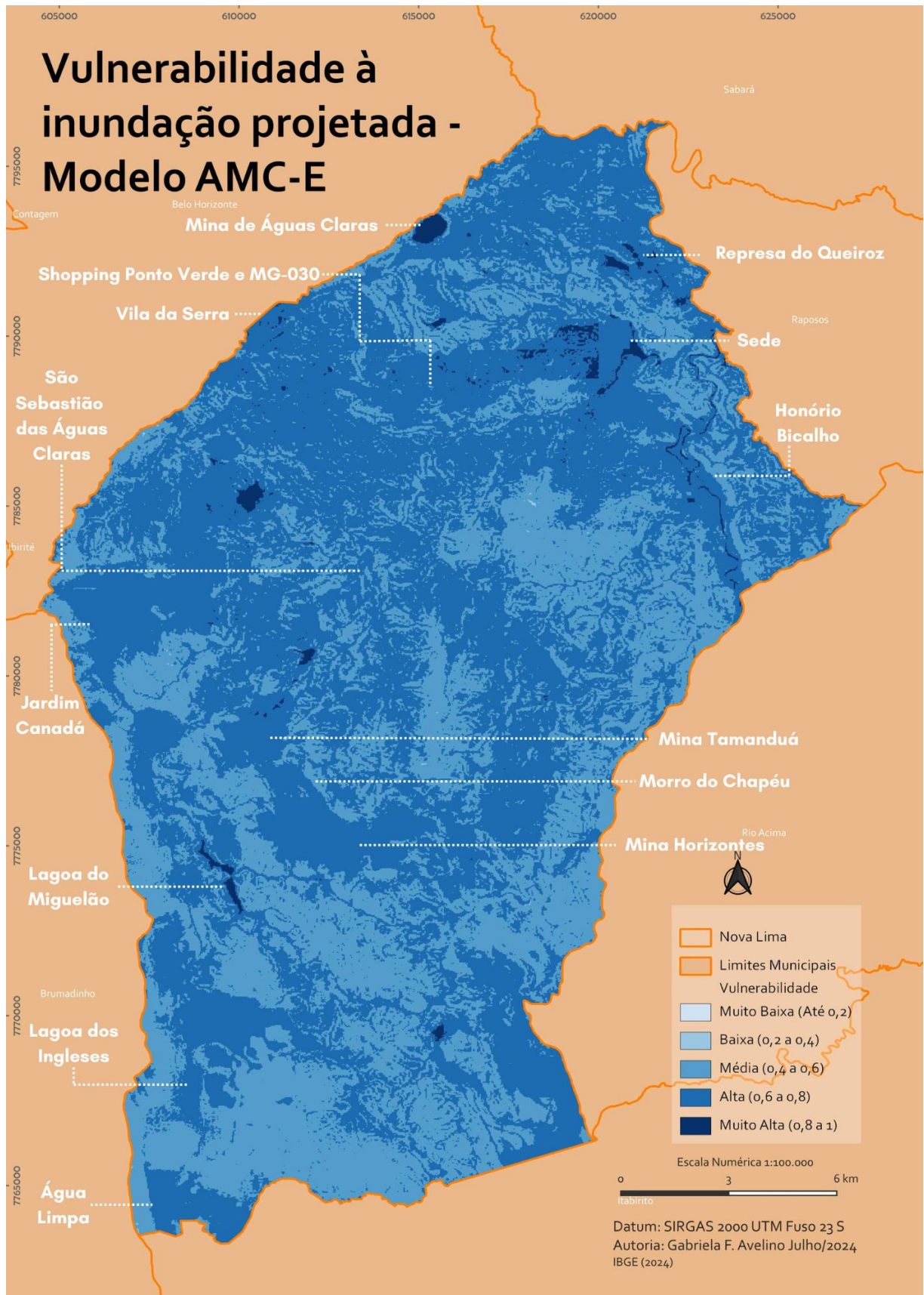


Figura 8 Precipitação média mensal projetada para o período de 2021 a 2024. Fonte: Elaborado pela autora, 2024

## 5.1 Modelo de vulnerabilidade à inundação AMC-E



Mapa 7 Mapa de Vulnerabilidade   inundação AMC-E. Fonte: Elaborado pela autora, 2024

O modelo AMC-E (Mapa 7) teve seus pesos determinados com base na bibliografia e no conhecimento de especialistas. É possível observar áreas com maior vulnerabilidade no vale do Rio das Velhas, especialmente próximas à Honório Bicalho e à sede do município.

Para que possamos analisar esse resultado, é interessante lembrar quais os pesos determinados para cada variável.

Quadro 5 Pesos atribuídos às variáveis no modelo AMC-E. Fonte: Elaborado pela autora, 2024

<b>Variável</b>	<b>Peso</b>
Fluxo Acumulado	10%
Hipsometria	25%
Precipitação	20%
Declividade	30%
Uso do Solo	15%

A declividade é a variável com maior peso nesse modelo, ou seja, com maior influência. A porção norte e central de Nova Lima tem o terreno mais acidentado, com declividades entre 10 e 20°. Já na região do bairro Jardim Canadá, Vale do Sol, Lagoa do Miguelão, e Lagoa dos Ingleses, a declividade é inferior à 10°, demonstrando que essas áreas são menos acidentadas, mais aplainadas, ou seja, com maior capacidade de represamento do fluxo.

Os vales do Rio das Velhas na proximidade de Honório Bicalho e do Ribeirão Água Suja ou Cardoso também apresentam topografia mais suavizada quando comparada ao resto do município.

A hipsometria contribui para que ocorram classes de alta e muito alta vulnerabilidade próximas à Honório Bicalho e seguindo o vale do Rio das Velhas, pois essas são as áreas mais baixas da área de estudo. O vale do Ribeirão Macacos também é rebaixado na paisagem, o que contribuiu para os valores elevados na região de São Sebastião das Águas Claras.

O bairro Jardim Canadá tenha altimetria elevada no contexto municipal, os maiores valores de precipitação mensal acumulada para o período 2021-2040 ocorrem na região, com valores superiores à 356 mm. Há também uma faixa de pluviosidade elevada, em formato de “C” que vai da proximidade da Mina Horizonte à São Sebastião das Águas Claras. O que é alinhado com o que diz Machado (2021) a respeito da altimetria influenciar na localização da precipitação no município de Nova Lima. Onde tem-se que chove mais nas áreas mais altas.

O Vale do Rio das Velhas tem os menores valores, entre 325 e 334 mm, mas esse fato não é suficiente para diminuir as classes da região, posto que a declividade e hipsometria tem maior peso.

Pode-se perceber a influência do uso do solo com a análise das áreas urbanas e áreas de mineração. Esses locais têm alta impermeabilização, por isso, a suscetibilidade à inundação é elevada. O que contribui para os valores altos em lugares inesperados como a região do Vila da Serra e Vale do Sereno e na proximidade do condomínio Morro do Chapéu.

O modelo AMC-E não apresenta valores de muito baixa vulnerabilidade. O intervalo dos valores de vulnerabilidade vai de 0,32 a 0,92. A área em hectares e percentual de cada classe, apresentado no Quadro 6 demonstra 58,98% do município de Nova Lima está em área de alta vulnerabilidade e 40,14% em área de média vulnerabilidade.

Quadro 6 Área em hectares ocupada pelas classes de vulnerabilidade no modelo AMC-E. Fonte: Elaborado pela autora, 2024

<b>Classe</b>	<b>Área (ha)</b>	<b>Percentual</b>
Baixa Vulnerabilidade	4,85	0,01%
Média Vulnerabilidade	17.230,61	40,14%
Alta Vulnerabilidade	25.316,63	58,98%
Muito Alta Vulnerabilidade	374,01	0,87%

É possível observar no mapa que as classes com maior frequência são média vulnerabilidade, com valores entre 0,4 e 0,6 e alta vulnerabilidade com valores entre 0,6 e 0,8. O histograma (Gráfico 5) apresenta a distribuição da frequência das ocorrências.

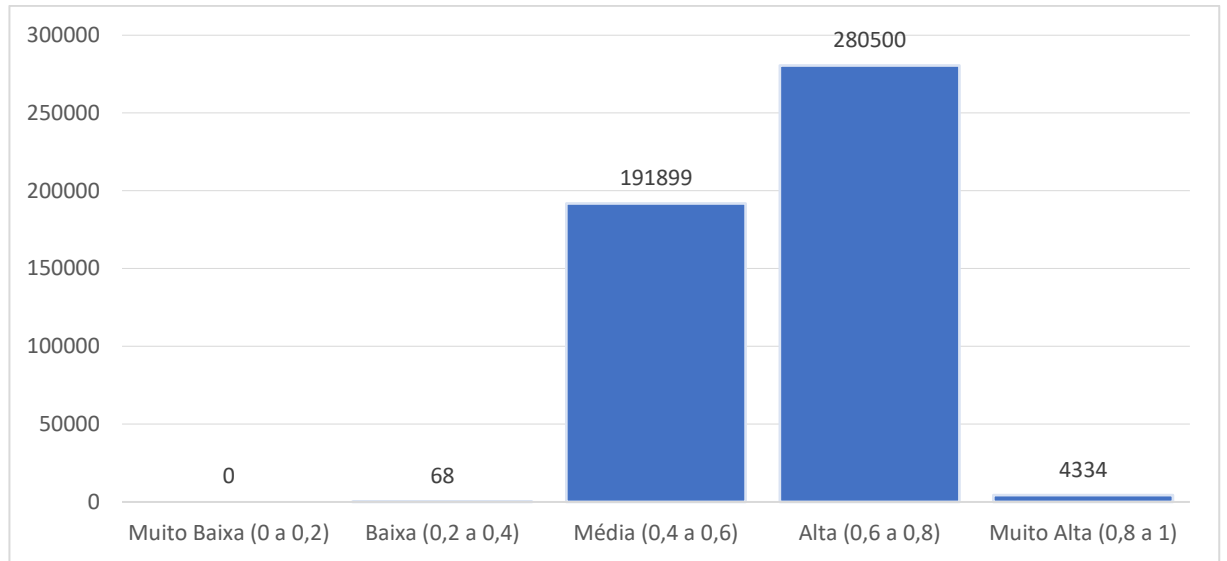


Gráfico 5 Histograma do modelo AMC-E. Fonte: Elaborado pela autora, 2024

Para a análise de autocorrelação espacial, utilizou-se o I de Moran Local (LISA). O valor do I de Moran para esse modelo é 0.876, com uma inclinação positiva, o que indica a existência de autocorrelação positiva (Figura 9). Os valores altos são cercados por outros valores altos e os valores baixos têm como vizinhos outros valores baixos.

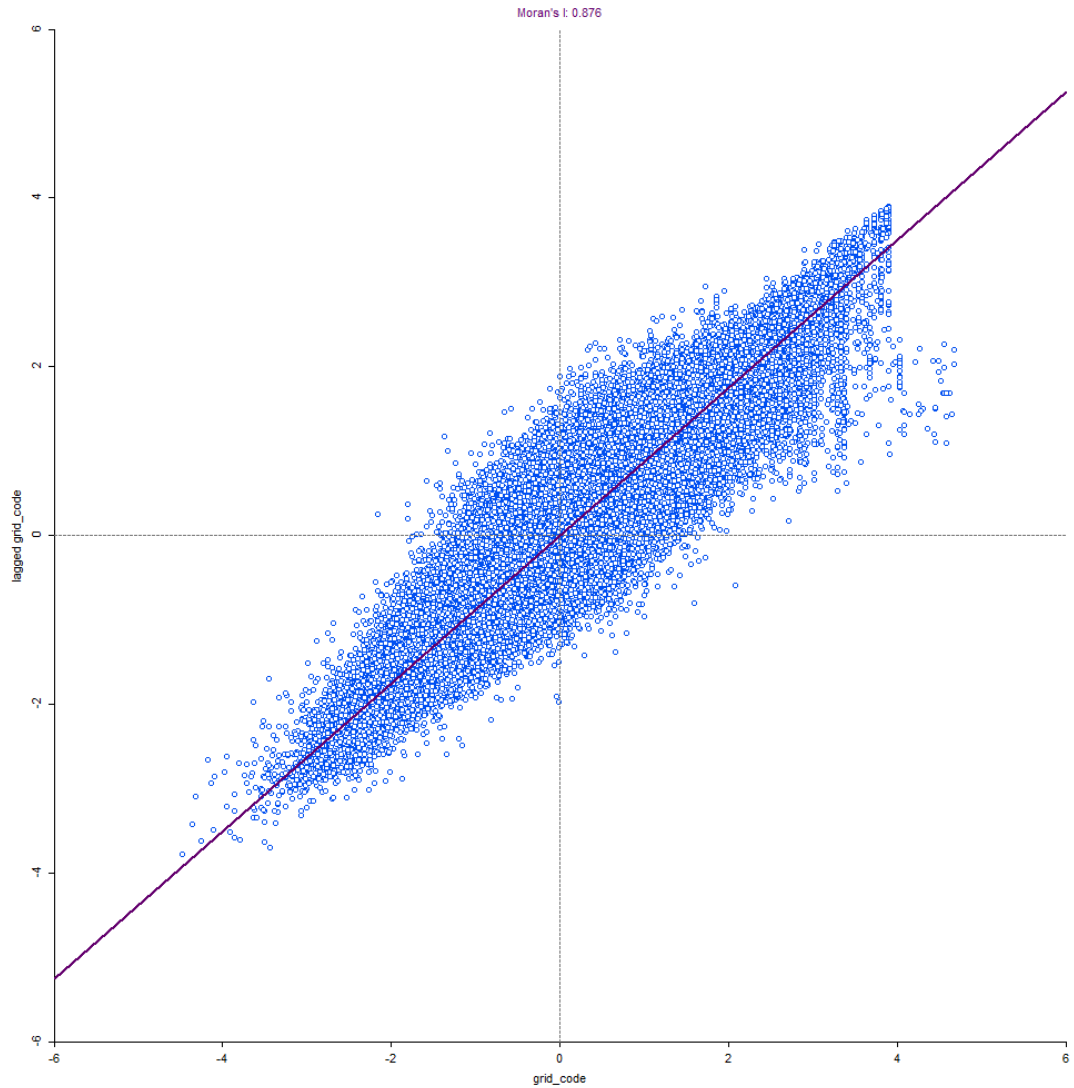


Figura 9 I de Moran para AMC-E. Fonte: Elaborado pela autora, 2024

Com a análise da figura de agrupamentos LISA para o modelo AMC-E (Figura 10), pode-se perceber os agrupamentos alto-alto (em vermelho) na região do bairro Jardim Canadá, da sede municipal, de Honório Bicalho, no condomínio Morro do Chapéu, no bairro Água Limpa, na Lagoa dos Ingleses e Alphaville.

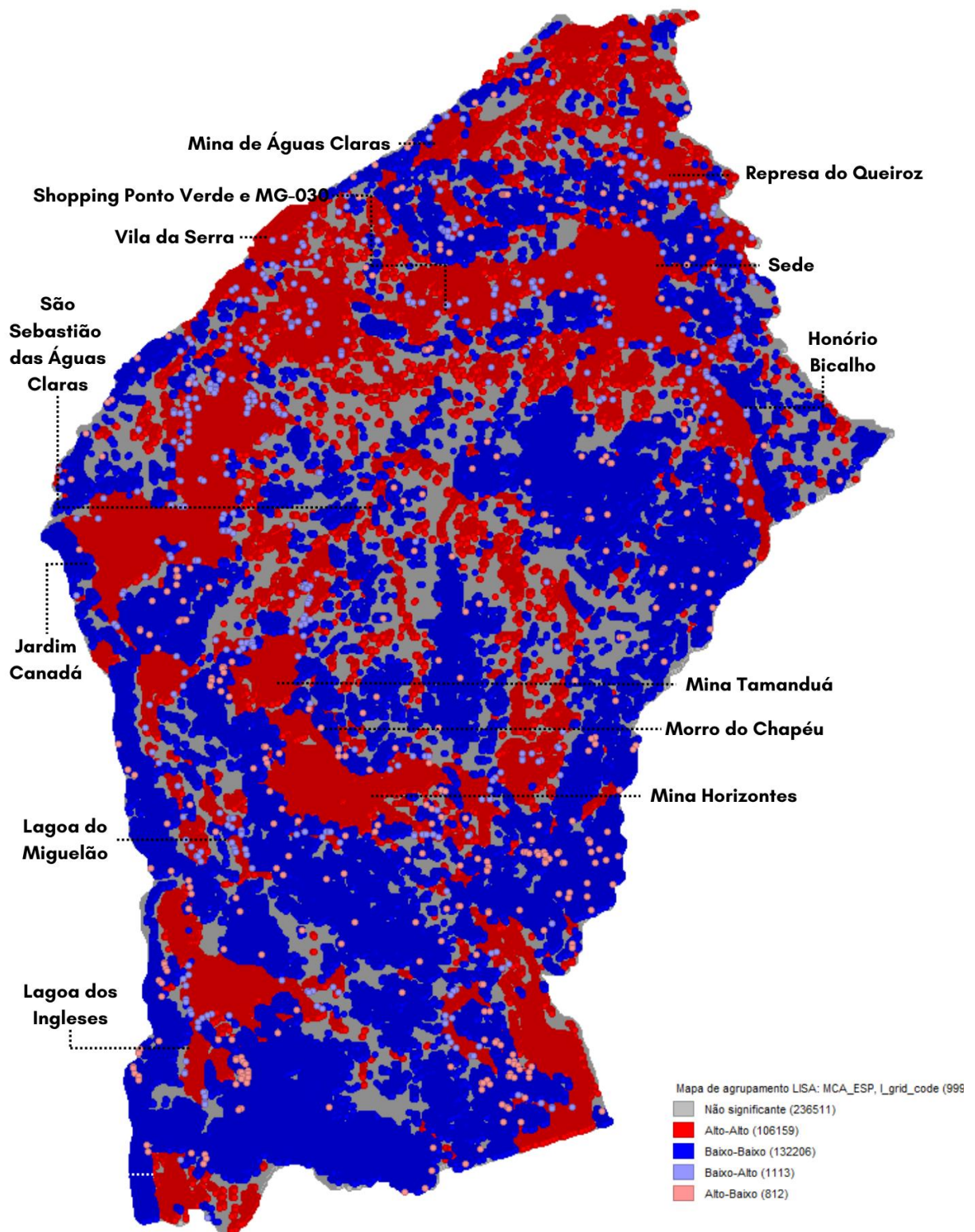
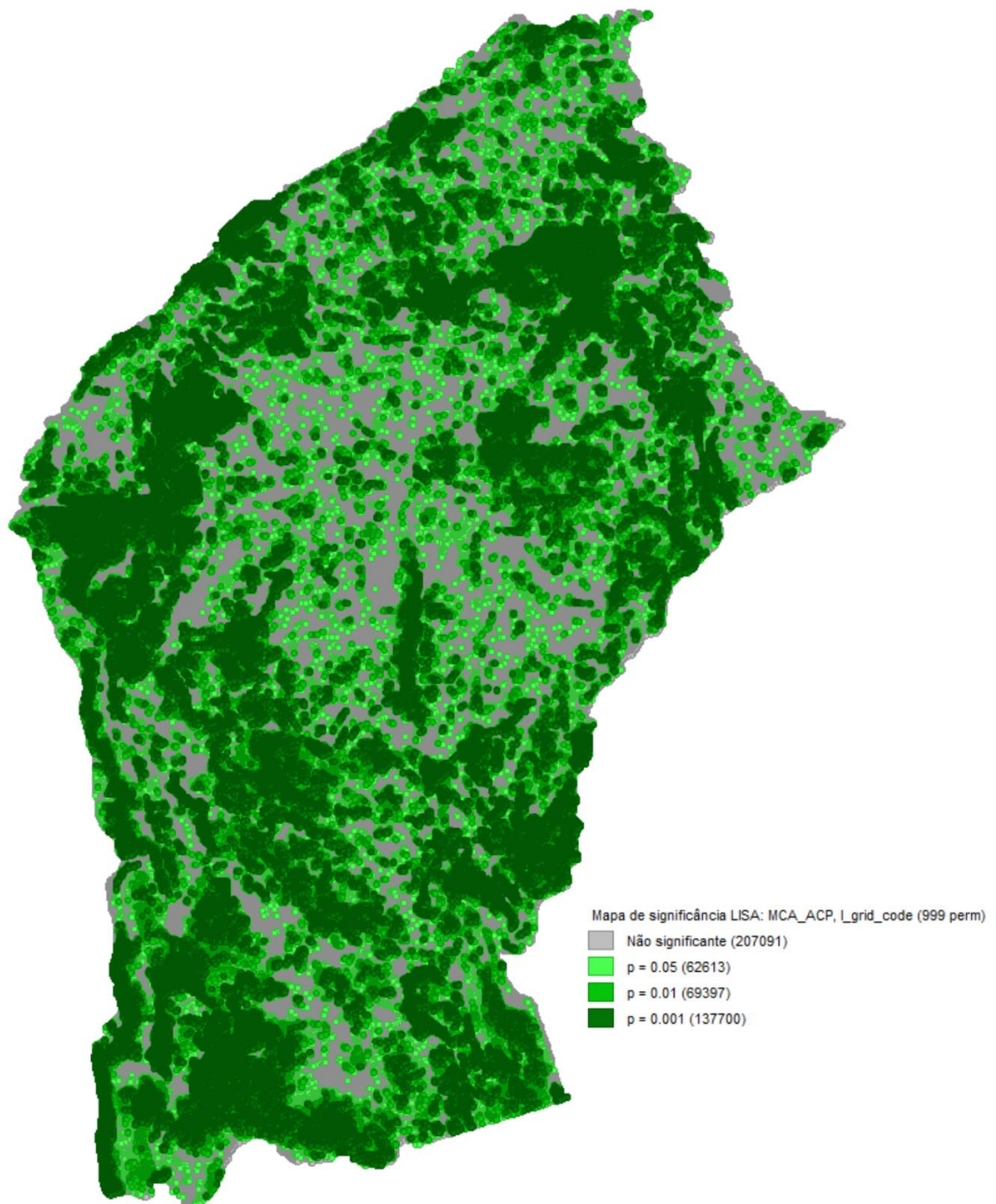


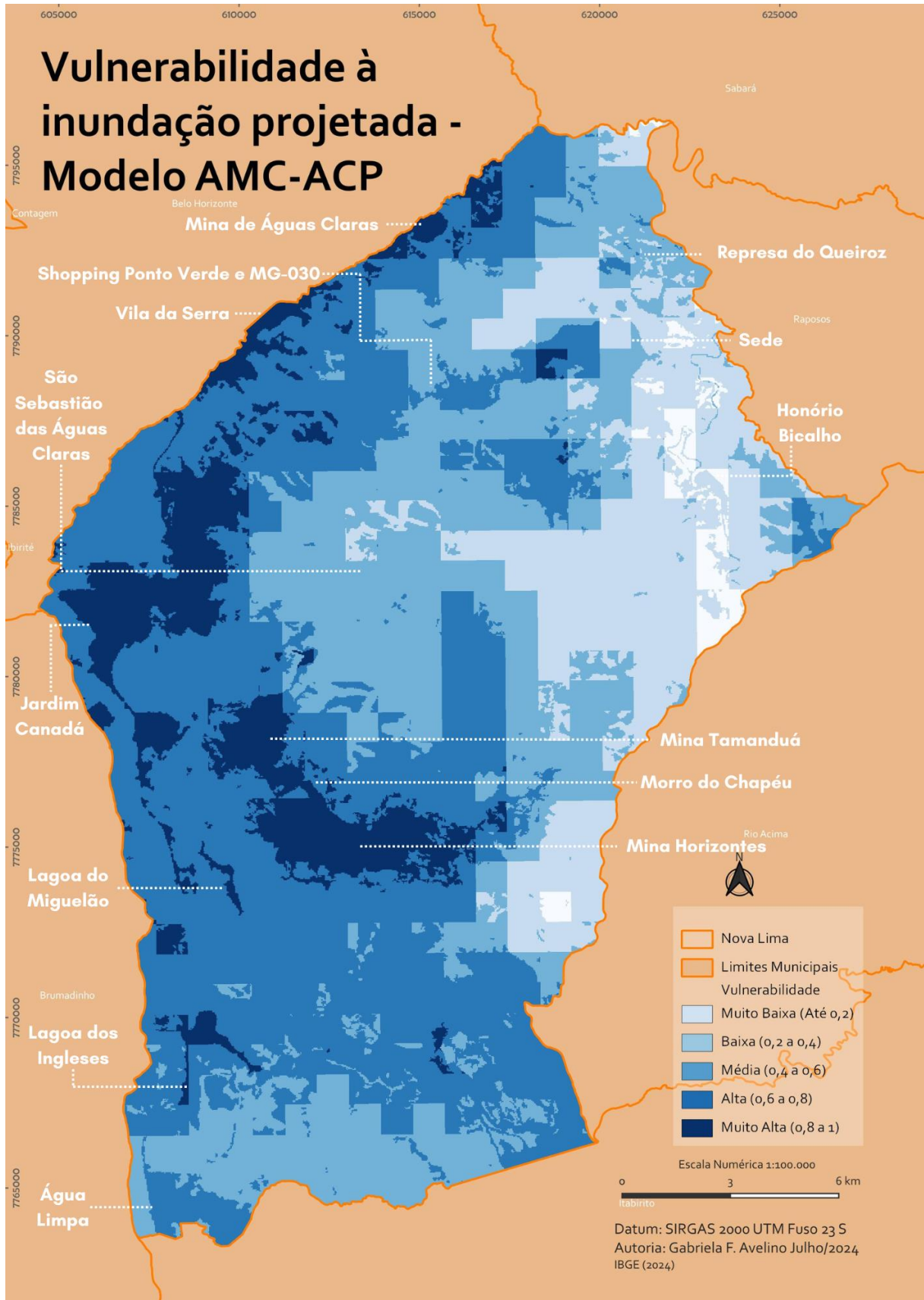
Figura 10 Cartograma de agrupamento LISA para AMC-E. Fonte: Elaborado pela autora, 2024

Outro elemento importante na análise LISA é o mapa de significância (Figura 11) que traz a significância estatística daquele valor. Valores inferiores à alfa (0,05) apresentam significância, o que demonstra que a improbabilidade desse resultado ser ao acaso.



. Figura 11 Cartograma de significância LISA para AMC-E. Fonte: Elaborado pela autora, 2024

## 5.2 Modelo de vulnerabilidade à inundação AMC-ACP



Mapa 8 Mapa de Vulnerabilidade   inundação AMC-ACP, Fonte: Elaborado pela autora, 2024

O modelo AMC-ACP (Mapa 8) teve seus pesos determinados de forma objetiva através dos escores da análise de componentes principais (ACP).

Desse modo, o Quadro 7 é apresenta pesos determinados para cada variável.

Quadro 7 Pesos atribuídos às variáveis no modelo AMC-ACP. Fonte: Elaborado pela autora, 2024

<b>Variável</b>	<b>Peso</b>
Fluxo Acumulado	0.000000144925
Hipsometria	0.000000108201
Precipitação	0.327756216850
Declividade	-0.000000033082
Uso do Solo	0.100425813951

É possível observar a distribuição da vulnerabilidade no modelo AMC-ACP está atrelada de maneira mais forte à variável de precipitação. Dessa maneira, a região dos bairros Jardim Canadá, Condomínio Morro do Chapéu e Vila da Serra são as áreas com a vulnerabilidade muito alta.

Ainda que não existam históricos conhecidos de inundação para essas áreas, essas são as áreas com a expectativa de maior precipitação acumulada, o que, conforme o modelo AMC-ACP as torna mais vulneráveis.

Outro aspecto que contribui para o valor muito alto (entre 0,8 e 1) dessas áreas, que são urbanizadas e áreas de mineração, é o peso do uso do solo nesse modelo. Sendo a segunda variável de maior influência, as áreas de solo impermeabilizado são mais suscetíveis à inundação do que outras onde o solo se mantém permeável.

A maior parte das outras áreas urbanas do município são classificadas como alta ou média vulnerabilidade (0,6 a 0,8), como o conjunto de bairros e condomínios próximos ao Shopping Ponto Verde e condomínio Ouro Velho.

Quanto a sede municipal, percebe-se novamente o grande controle da precipitação. A área com grande precipitação acumulada se destaca sendo a única área de vulnerabilidade muito alta, enquanto outra porção da sede é classificada como alta e outra média (0,4 a 0,6).

A área em hectares e percentual de cada classe, apresentado no Quadro 8 demonstra 42,44% do município de Nova Lima está em área de alta vulnerabilidade e 30,03% em área de média vulnerabilidade.

Quadro 8 Área em hectares ocupada pelas classes de vulnerabilidade no modelo AMC-ACP. Fonte: Elaborado pela autora, 2024

Classe	Área (ha)	Percentual
Muito Baixa Vulnerabilidade	699,99	1,63%
Baixa Vulnerabilidade	6.685,52	15,57%
Média Vulnerabilidade	12.890,33	30,03%
Alta Vulnerabilidade	18.220,41	42,44%
Muito Alta Vulnerabilidade	4.432,27	10,32%

O modelo AMC-ACP apresenta valores num intervalo de 0,07 a 0,98. O histograma (Figura 12) apresenta a distribuição percentual das classes.

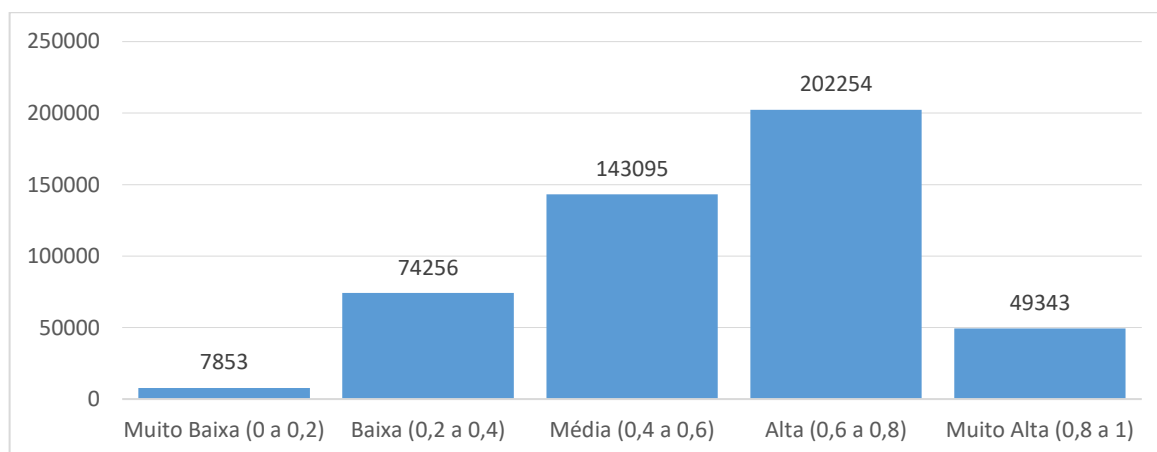


Figura 12 Histograma do modelo AMC-ACP. Fonte: Elaborado pela autora, 2024

É possível observar no mapa e no histograma que as classes com maior frequência são média vulnerabilidade, com valores entre 0,4 e 0,6 e alta vulnerabilidade com valores entre 0,6 e 0,8.

A análise de autocorrelação espacial, foi realizada através do método LISA. O valor do I de Moran para esse modelo é 0,982, com uma inclinação positiva, o que indica a existência de autocorrelação positiva (Figura 13). Os valores altos são cercados por outros valores altos e os valores baixos têm como vizinhos outros valores baixos.

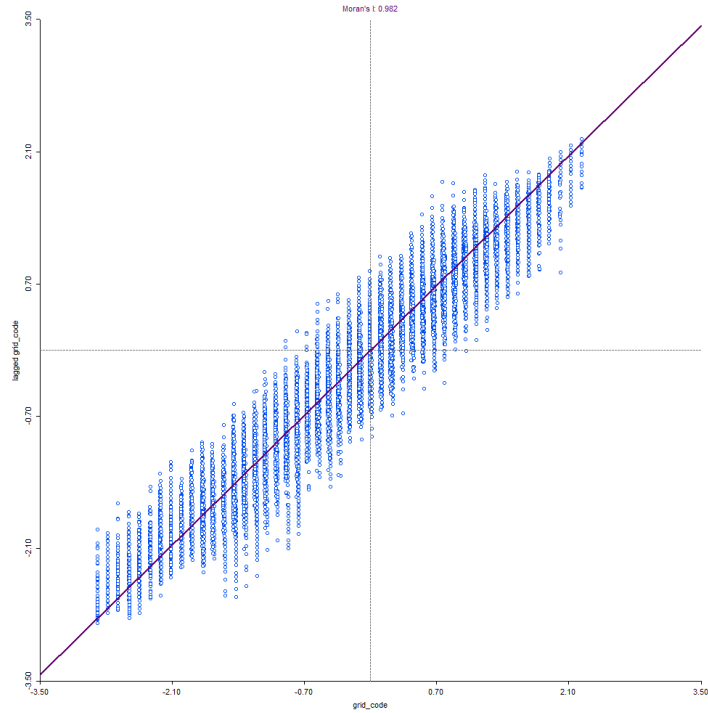


Figura 13 I de Moran do modelo AMC-ACP. Fonte: Elaborado pela autora, 2024

O mapa de agrupamentos gerado através do LISA (Figura 14 **Erro! Fonte de referência não encontrada.**), apresenta os agrupamentos alto-alto (em vermelho) na região do bairro Jardim Canadá, Vila da Serra, Lagoa do Miguelão e Lagoa dos Ingleses. Esse agrupamento significa que são valores altos cercados de outros valores altos.

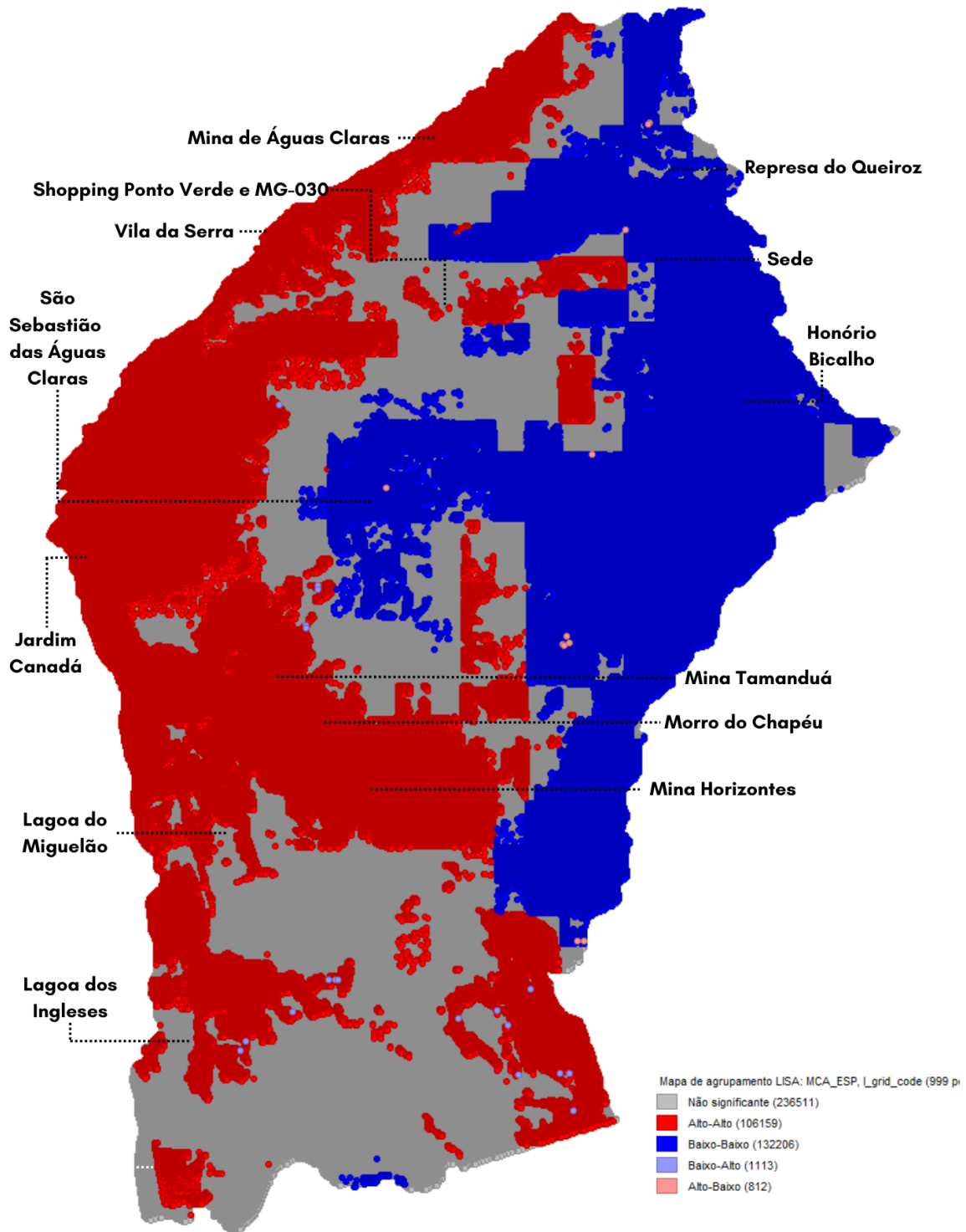


Figura 14 Cartograma de agrupamento LISA para AMC-ACP, Fonte: Elaborado pela autora, 2024

Por fim, o mapa de significância (Figura 15) apresenta qual as áreas em que o resultado tem maior significância estatística, ou seja, menor probabilidade de que a autocorrelação espacial seja atribuída ao acaso.

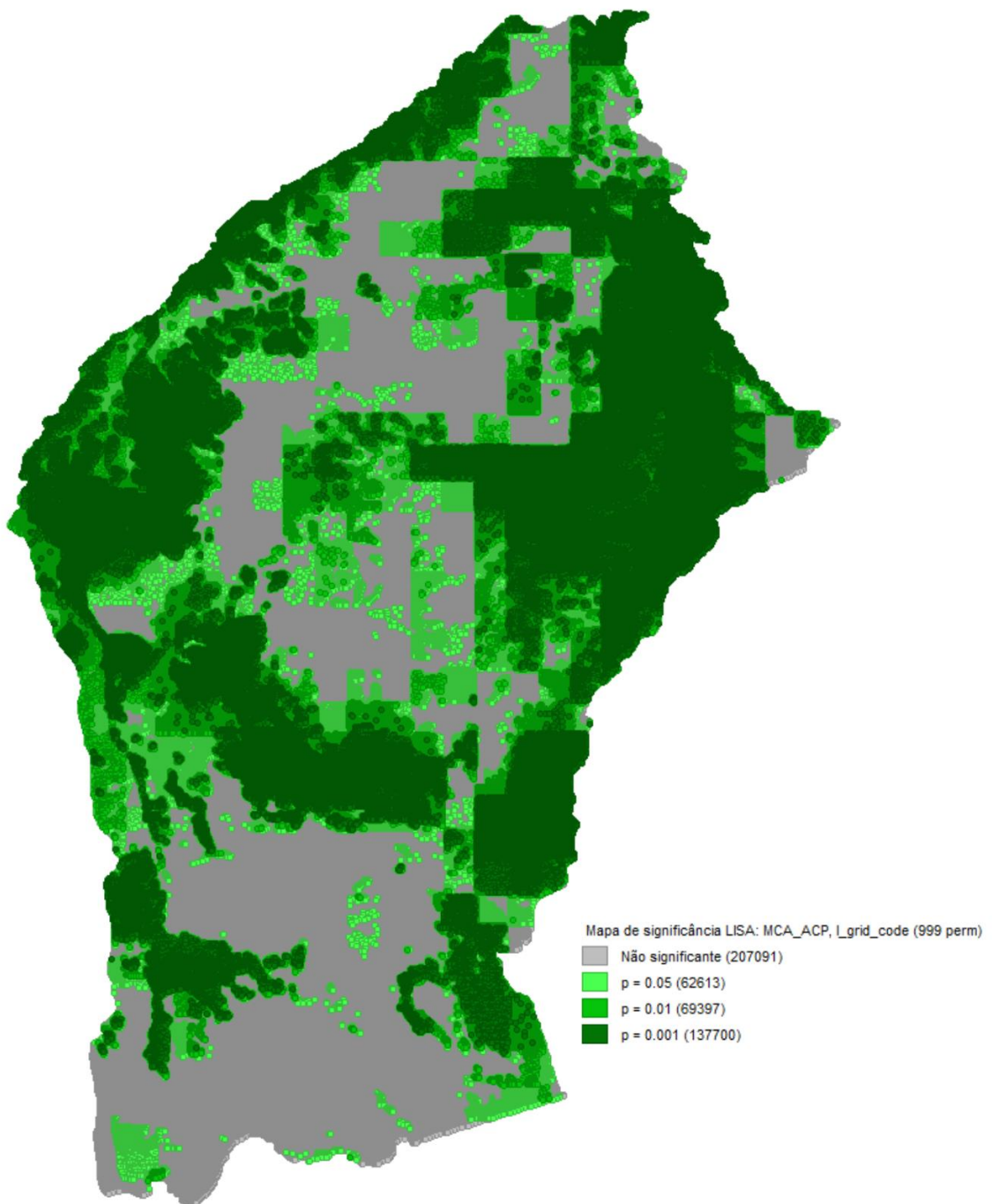


Figura 15 Cartograma de Significância do modelo AMC-ACP. Fonte: Elaborado pela autora, 2024

### 5.3 Acurácia dos modelos

A acurácia dos modelos foi verificada através da comparação dos seus resultados com pontos conhecidos de inundação no município de Nova Lima. O esperado com essa comparação é que os pontos conhecidos de inundação sejam coincidentes com áreas categorizadas como

alta e muito alta vulnerabilidade à inundação. Pois assim é possível falar da capacidade do modelo em representar a ocorrência de inundações.

O Quadro 9 apresenta a tabela de contingência da comparação entre os pontos conhecidos e os modelos AMC-E e AMC-ACP. Em verde estão destacados os eventos de acerto, ou seja, onde houve ocorrência de inundação e o modelo indicou alta e muito alta vulnerabilidade. Em vermelho temos os eventos de erro, que são os lugares com o histórico de inundação e os modelos não classificaram como alta ou muito alta vulnerabilidade.

Quadro 9 Tabela de Contingência. Fonte: Elaborado pela autora, 2024

Ponto	AMC-E	AMC-ACP
1	0,823	0,491
2	0,742	0,491
3	0,772	0,687
4	0,811	0,491
5	0,834	0,726
6	0,752	0,452
7	0,775	0,316
8	0,789	0,374
9	0,818	0,376
10	0,587	0,273
11	0,795	0,491
12	0,746	0,687
13	0,794	0,745
14	0,797	0,491
15	0,752	0,452
16	0,753	0,491
17	0,817	0,472
18	0,756	0,355
19	0,838	0,454

O Quadro 10 apresenta o percentual das classes nos modelos AMC-E e AMC-ACP nos pontos conhecidos de inundação. É possível observar que 63% dos pontos conhecidos de inundação estão em áreas altas e 32% estão em áreas de muito alta vulnerabilidade no modelo AMC-E. Para o modelo AMC-ACP, 53% dos pontos conhecidos estão em área de média vulnerabilidade e 21% em área de alta vulnerabilidade.

Quadro 10 Classificação dos pontos de inundação conhecidos conforme os modelos AMC-E e AMC-ACP. Fonte: Elaborado pela autora, 2024

<b>Classe</b>	<b>AMC-E</b>	<b>AMC-ACP</b>
Muito Baixa (0 a 0,2)	0%	0%
Baixa (0,2 a 0,4)	0%	26%
Média (0,4 a 0,6)	5%	53%
Alta (0,6 a 0,8)	63%	21%
Muito Alta (0,8 a 1)	32%	0%

A partir da tabela de contingência, foi possível calcular o índice crítico de sucesso para cada um dos modelos (Quadro 11).

Quadro 11 Cálculo do índice crítico de sucesso para os modelos AMC-E e AMC-ACP. Fonte: Elaborado pela autora, 2024

	<b>AMC-E</b>	<b>AMC-ACP</b>
Acertos	18	4
Erros	1	15
Amostras observadas	19	19
ICS	94,7%	21,1%

#### 5.4 Comparação entre os modelos

Para iniciar uma análise comparativa entre os dois modelos é necessária a visualização lado a lado de seus resultados (Figura 16).

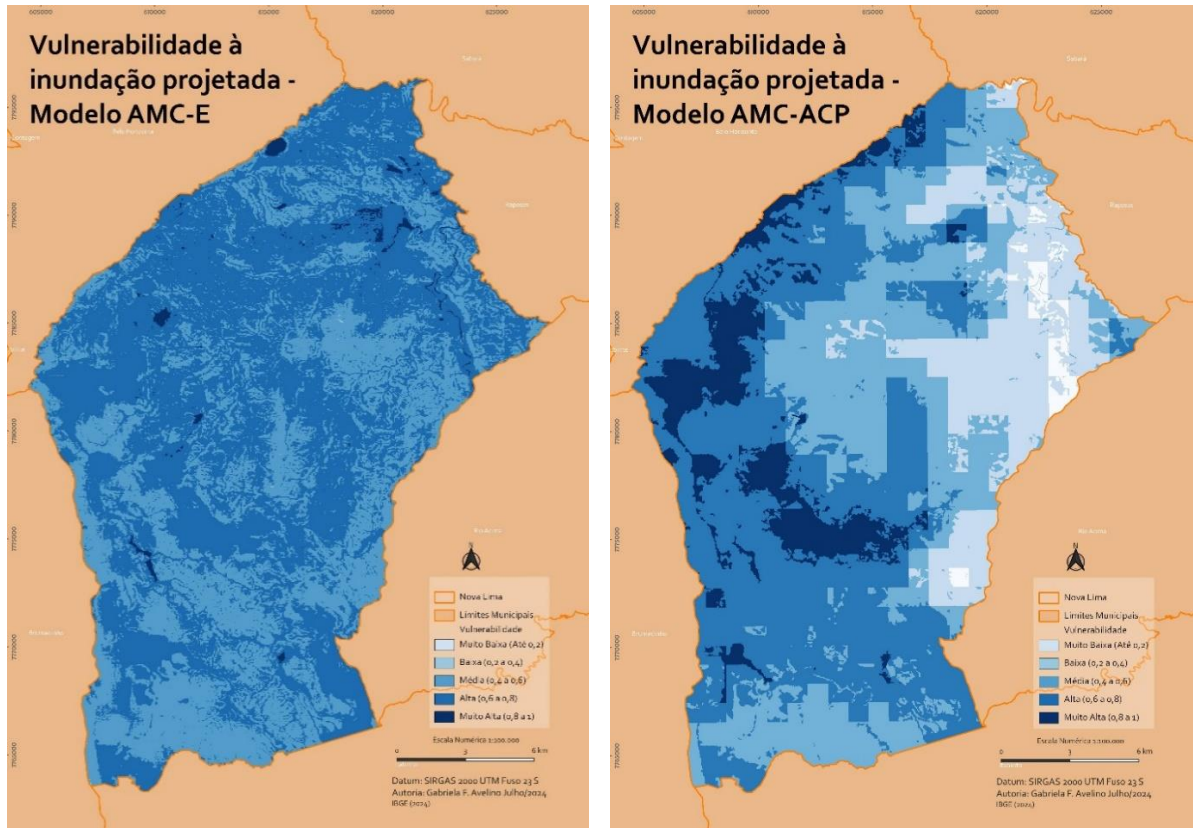


Figura 16 Comparação entre os modelos AMC-E e AMC-ACP. Fonte: Elaborado pela autora, 2024

Outra comparação visual interessante de ser feita é a da espacialização dos agrupamentos determinados pelo LISA (Figura 17).

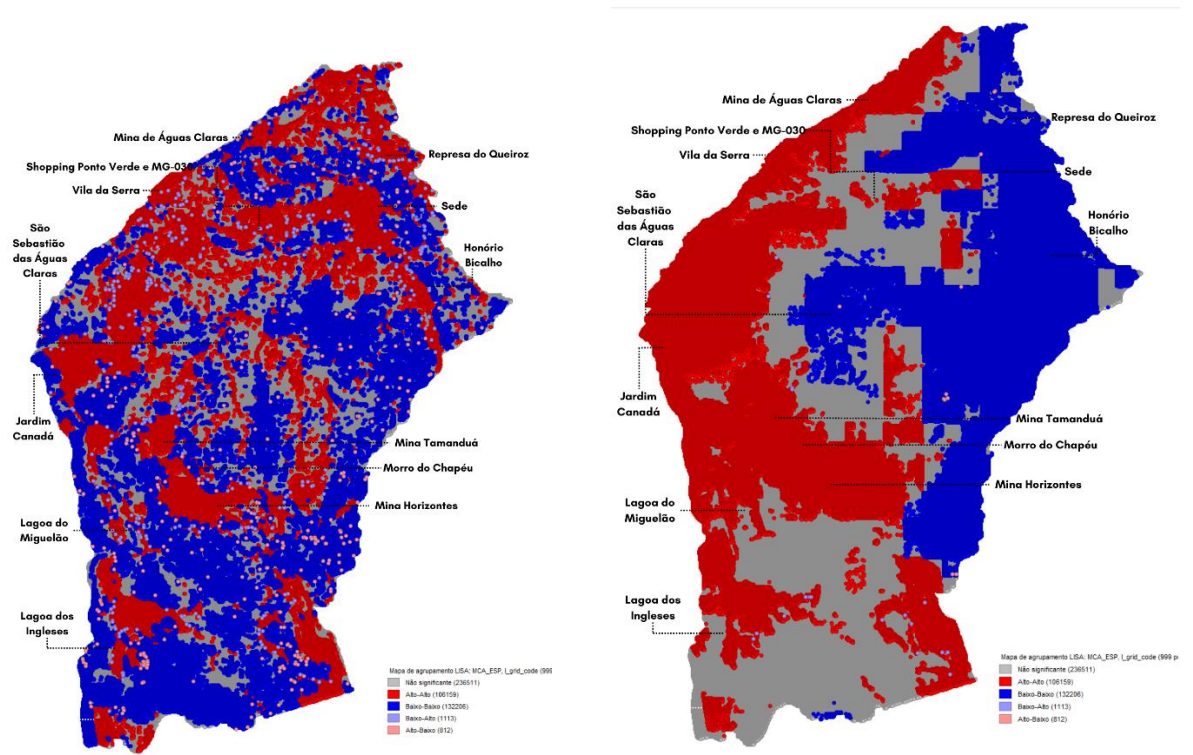


Figura 17 Comparação entre agrupamentos do LISA. Modelo AMC-E à esquerda e AMC-ACP à direita. Fonte: Elaborado pela autora, 2024.

A Figura 20 torna mais evidente as semelhanças e divergências dos modelos. É possível observar a coincidência de valores altos na região do Jardim Canadá e Condomínio Morro do Chapéu, e em contrapartida, a divergência na região da sede municipal e do bairro Honório Bicalho.

A comparação entre os pontos históricos de inundação e os agrupamentos da estatística LISA do modelo AMC-E são apresentados na Figura 18. É possível observar que os pontos históricos (em amarelo) são coincidentes com agrupamentos alto-alto.

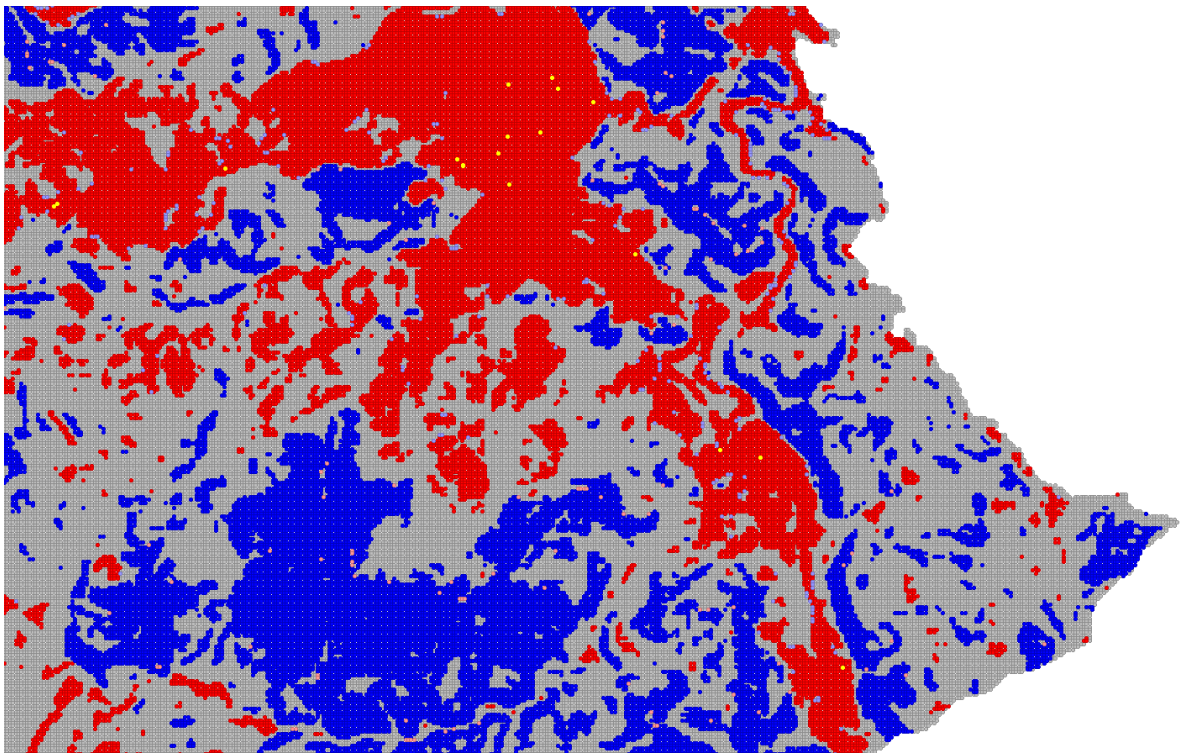


Figura 18 Detalhe da comparação entre o mapa de agrupamentos LISA do modelo AMC-E e os pontos históricos de inundação. Fonte: Elaborado pela autora, 2024.

A comparação dos pontos históricos de inundação com o mapa de agrupamentos do modelo AMC-ACP retorna agrupamentos baixo-baixo e alto-alto nas localidades de histórico conhecido de inundação (Figura 19).

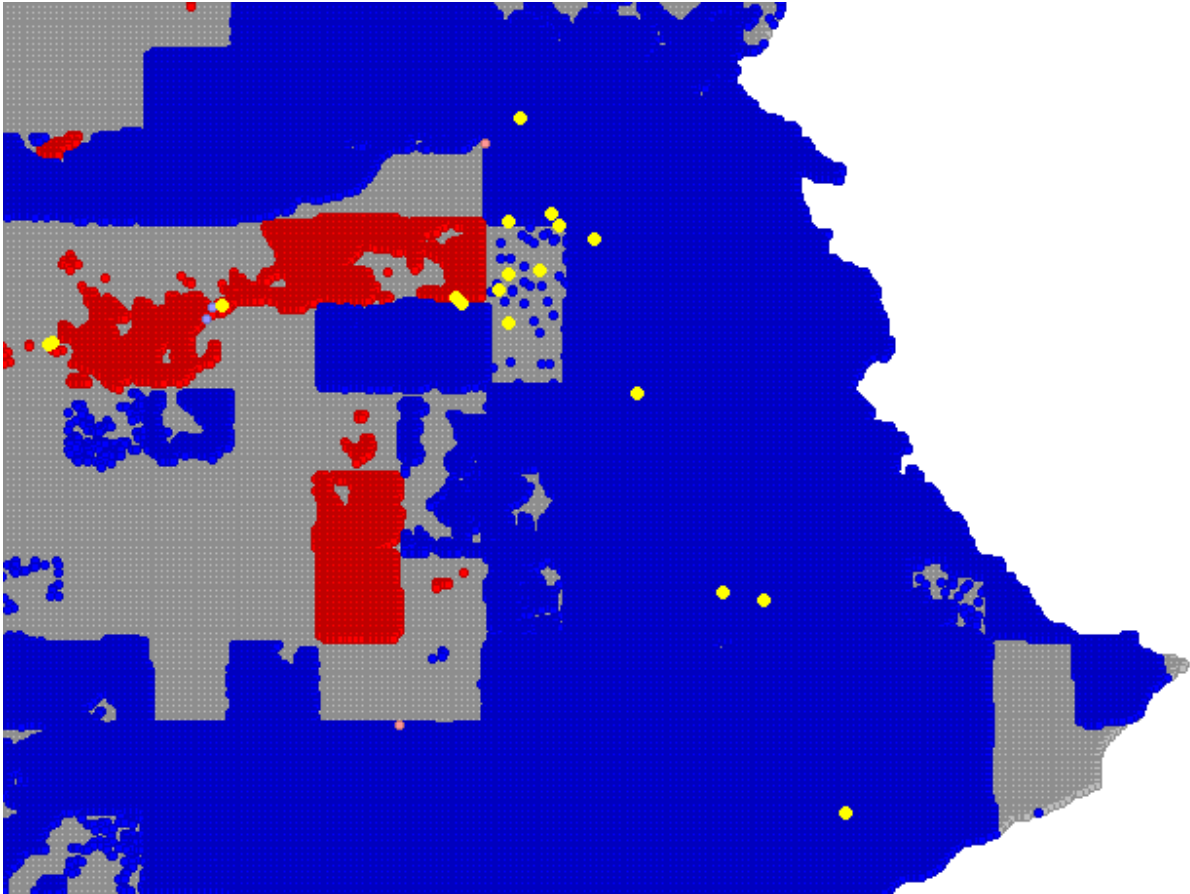


Figura 19 Detalhe da comparação entre o mapa de agrupamentos LISA do modelo AMC-ACP e os pontos históricos de inundação. Fonte: Elaborado pela autora, 2024.

Ainda que visualmente seja possível identificar as similaridades e diferenças entre os modelos, o Quadro 12 apresenta a similaridade e diferenças das classificações.

Quadro 12 Similaridades e diferenças das classes dos modelos AMC-ACP e AMC-E. Fonte: Elaborado pela autora, 2024

		Modelo AMC-ACP				
Modelo AMC-E	Classes	MB	B	M	A	MA
	MB	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
	B	0.00%	0.00%	0.01%	0.01%	0.00%
	M	1.01%	8.82%	13.35%	16.78%	0.29%
	A	0.64%	6.70%	16.46%	25.34%	9.69%
	MA	0.00%	0.06%	0.19%	0.30%	0.36%

O percentual apresentado é referente à quantas amostras de cada classe foram classificadas da mesma maneira no outro modelo. Por exemplo, apenas 0,36% das áreas classificadas como muito alto no modelo AMC-E também foram classificadas como muito alto no modelo AMC-ACP. Ou nenhuma área classificada como muito baixo no modelo AMC-ACP também foi classificada como muito baixo pelo modelo AMC-E.

É possível observar que 0,64% das áreas de valor muito baixo (MB) e 6,70% de áreas de valor baixo (B) no modelo AMC-ACP são classificadas como alta vulnerabilidade (AB) pelo modelo AMC-E. Na perspectiva da similaridade, 25,34% das áreas são classificadas da mesma forma nos dois modelos, como alta vulnerabilidade (A).

Praticamente nenhuma área de alta ou muito alta vulnerabilidade no modelo AMC-ACP foi classificada como muito baixa ou baixa pelo modelo AMC-E. O contrário por sua vez, não é verdadeiro. 6,70% das áreas de alta vulnerabilidade do modelo AMC-E foram classificadas como baixas por AMC-ACP.

A Figura 20 mostra a espacialização dessas similaridades e divergências, seguindo a lógica apresentada Quadro 12.

# Similaridades e Divergências entre os modelos

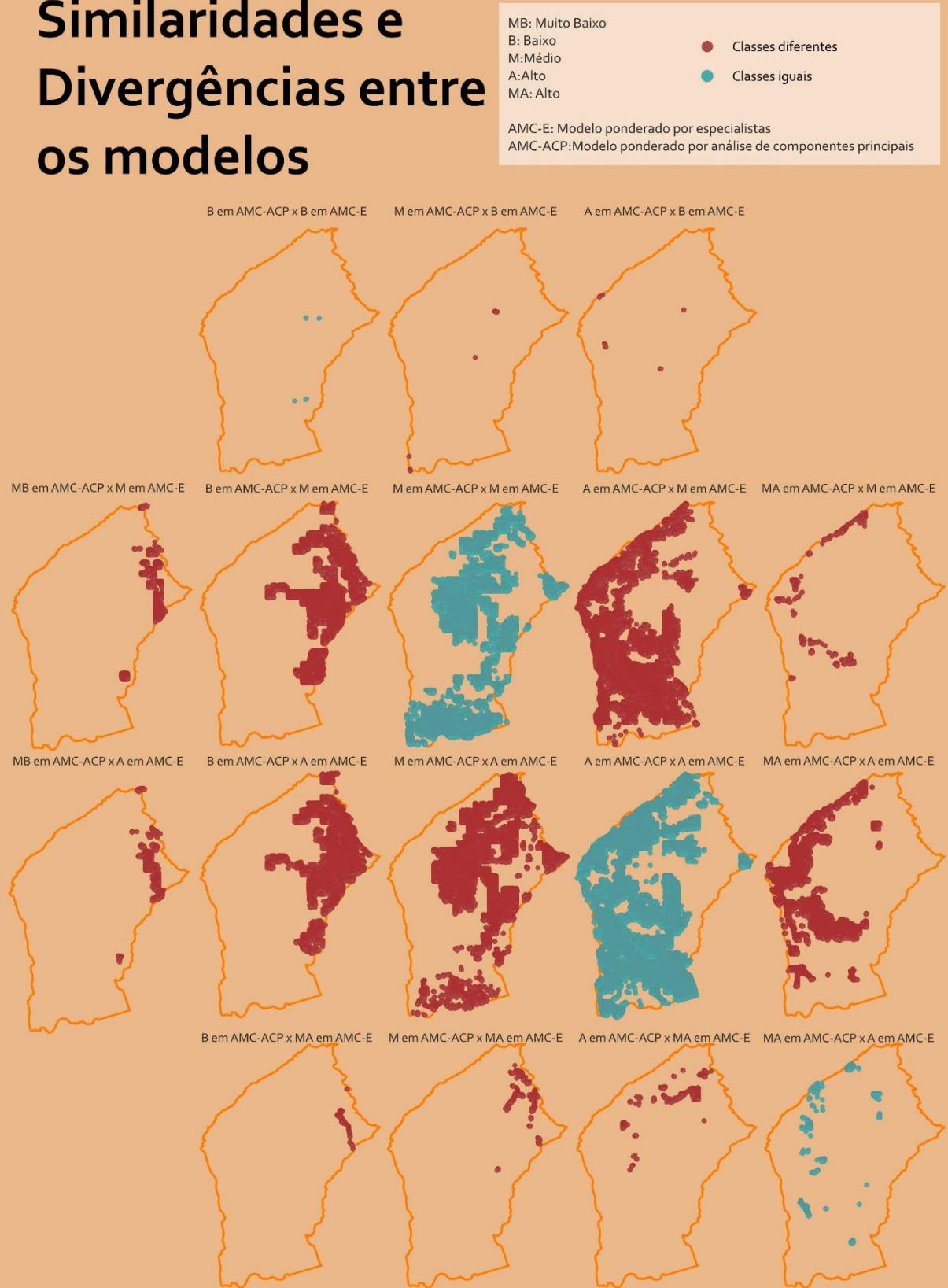


Figura 20 Similaridades e diferenças das classes dos modelos AMC-ACP e AMC-E. Fonte: Elaborado pela autora, 2024

## 5.5 Discussão

Os resultados indicaram que o modelo subjetivo, ponderado por especialistas (AMC-E), apresentou um Índice Crítico de Sucesso (ICS) significativamente superior (94,7%) em comparação ao modelo objetivo, baseado em análise fatorial por componentes principais (21,1%). A partir dessa análise, o modelo AMC-E mostrou-se mais acurado quando comparado ao modelo AMC-ACP, oferecendo uma representação mais precisa das áreas vulneráveis a inundações.

Deve-se destacar que a maior parte dos pontos conhecidos de inundação estão localizados juntos à sede municipal e Honório Bicalho, representando uma limitação nessa análise de acurácia. Não é possível discorrer a respeito da ocorrência ou não de inundação em outros pontos da cidade de Nova Lima devido à ausência de dados. Para que houvesse menos limitações a respeito da acurácia desse modelo, seria necessário um volume maior de locais conhecidos de ocorrência ou não ocorrência de inundação em Nova Lima.

A análise de dependência espacial através da estatística LISA reforça o resultado da adequação do modelo AMC-E em detrimento do modelo AMC-ACP pois identifica que agrupamentos alto-alto das classes de vulnerabilidade coincidem com locais históricos de inundações em Nova Lima. Isso significa que as áreas de vulnerabilidade acima da média do modelo tendem a estar umas próximas da outra. O que é esperado considerando um cenário de vulnerabilidade de inundação, onde fatores ambientais e geográficos criam zonas propensas a inundações.

No caso do modelo AMC-ACP, a estatística LISA mostra que alguns pontos históricos de inundação estão em agrupamentos alto-alto e outros em agrupamento baixo-baixo, sendo essas áreas onde uma região de baixa vulnerabilidade está cercada por outras de baixa vulnerabilidade.

Ambos os modelos apresentaram alto valor no Índice de Moran, expondo a alta correlação entre os valores. O que significa que as áreas vulneráveis estão agrupadas, criando zonas contínuas de maior risco, o que é esperado devido à natureza do fenômeno que é interligado e geograficamente concentrado. Mais um elemento que reforça a adequação do modelo AMC-E.

O modelo AMC-ACP, de ponderação objetiva, ainda que baseando em uma abordagem estatística robusta, não conseguiu abordar a complexidade das variáveis ambientais envolvidas na vulnerabilidade à inundação com a mesma precisão que o modelo ponderado por especialistas (AMC-E).

Isso pode ser explicado pela natureza multivariada dos riscos de inundação. Cabe lembrar que, no caso do modelo AMC-ACP, a variável de pluviosidade teve controle majoritário dos resultados do modelo, enquanto as outras variáveis foram praticamente anuladas, tornando o modelo extremamente sensível à variação da distribuição espacial das chuvas.

De maneira geral, esses resultados têm implicações significativas para o planejamento urbano e a elaboração de medidas de mitigação e adaptação às mudanças climáticas em Nova Lima. A identificação das áreas vulneráveis permite que as autoridades municipais priorizem intervenções nas regiões de maior risco, otimizando recursos e aumentando a resiliência da cidade frente às inundações.

Nesse sentido, tem-se áreas conhecidas como áreas vulneráveis à inundação, dado histórico. A sede municipal e o bairro de Honório Bicalho foram identificados no modelo AMC-E como sendo de alta e muito alta vulnerabilidade, reforçando a necessidade de atuação do poder público nesses lugares.

Por outro lado, algumas áreas identificadas como sendo de alta e muito alta vulnerabilidade projetada podem ser surpreendentes, como o bairro Jardim Canadá e a região do condomínio Morro do Chapéu, o que aponta a necessidade de uma atuação preventiva do poder público a fim de se evitar a ocorrência de inundações, pois importante destacar que o período em análise é entre 2021 e 2040.

Além disso, a aplicação da análise LISA para comparar os modelos trouxe uma camada adicional de compreensão sobre a distribuição espacial da vulnerabilidade. Indicando a capacidade preditiva robusta do modelo AMC-E. A capacidade de identificar os agrupamentos significativos de vulnerabilidade fornece mais um embasamento para o planejamento urbano, direcionando a atenção e propiciando maior eficiência na alocação de recursos e implementação de medidas de mitigação.

Por fim, a hipótese de que a comparação de diferentes metodologias de definição de pesos para a análise multicritério permitiria identificar o método mais assertivo foi aceita. O

modelo subjetivo, ponderado por especialistas (AMC-E), provou ser a abordagem mais eficaz para mapear áreas vulneráveis ao risco de inundação em Nova Lima para o período de 2021 a 2040. Essa conclusão não apenas valida a importância do conhecimento especializado na análise multicritério, mas também estabelece uma base sólida para futuras pesquisas e aplicações práticas no campo do planejamento urbano e gestão de riscos climáticos

## 6 CONCLUSÃO

Nesse trabalho foi realizado um estudo aprofundado sobre a identificação de áreas vulneráveis a inundações no município de Nova Lima, no período de 2021-2040, utilizando metodologias de análise multicritério.

As metodologias empregadas incluíram uma abordagem objetiva por meio da Análise de Componentes Principais (ACP) e uma abordagem subjetiva com pesos determinados por especialistas. A partir da modelagem de álgebra de mapas, foram gerados modelos de vulnerabilidade que foram comparados com pontos de ocorrência conhecidos de inundações.

Sob a ótica da avaliação da acurácia, o modelo AMC-E, de ponderação subjetiva demonstrou-se mais acurado que o modelo AMC-ACP. Enquanto o primeiro modelo teve índice crítico de sucesso de 94,7%, o segundo teve 21,1%. Demonstrando, nesse caso, que a ponderação realizada por especialista foi capaz de captar nuances relativas ao processo de ocorrência de inundações que o pacote de dados não conseguiu transmitir à ACP.

Passando para a análise dos resultados deste trabalho, os dois modelos apresentam resultados surpreendentes e inesperados. Os valores altos e muito altos encontrados em regiões sem histórico de inundação em Nova Lima, como por exemplo, Vila da Serra e próximo ao Condomínio Morro do Chapéu, mostram a influência da espacialização da precipitação no modelo.

Em conjunto com a análise do mapa de agrupamentos da análise de autocorrelação local (LISA), esse resultado inesperado pode funcionar como um alerta para que o poder público municipal atue de maneira preventiva à eventos de inundação nessas regiões.

Outras regiões já conhecidas pela ocorrência de inundação também foram identificadas pelos modelos com alta e muita alta vulnerabilidade. São os casos da sede municipal e do bairro de Honório Bicalho e vizinhança. O que reforça a necessidade de empenho de forças do poder público na atuação para a mitigação e prevenção de novos impactos nessas áreas.

Entende-se que a partir da discussão a respeito das metodologias proposta aqui, seja possível a elaboração de uma avaliação de risco climático projetado à inundação, uma vez que o perigo à inundação foi mapeado e identificado de maneira consistente.

A revisão bibliográfica realizada nesse trabalho contribui para o esforço de sintetizar o estado da arte sobre projeções e modelos climáticos, riscos e vulnerabilidade. Por fim, entende-

se que esse trabalho contribuiu com a análise de metodologias que podem ser utilizadas para a avaliação de vulnerabilidade à inundação de outras áreas de estudos.

## REFERÊNCIAS

- ADGER, W. N. **Vulnerability**. *Global Environmental Change*, v. 16, n. 3, p. 268–281, ago. 2006. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959378006000422>. Acesso em: 16 ago 2023.
- ALMEIDA, L. **Vulnerabilidades socioambientais de rios urbanos: bacia hidrográfica do rio Maranguapinho**. Região metropolitana de Fortaleza, Ceará. Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, p. 278, 22 abr. 2010. Disponível em: <http://hdl.handle.net/11449/104309>. Acesso em: 24 jul. 2024.
- ALMOUCTAR, M. A. S. et al. Flood risk assessment in arid and semi-arid regions using Multi-criteria approaches and remote sensing in a data-scarce region. **Journal of Hydrology: Regional Studies**, v. 54, p. 101862, 2024.  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214581824002106>. Acesso em 23 set. 2024
- ALVES, M. A. S. **Mapeamento da vulnerabilidade à mudança do clima em Uberlândia – Minas Gerais: orientações para a adaptação**. 2017. Tese – PUC Minas, 2017. Disponível em: [https://cb27.s3.amazonaws.com/2\\_\\_ALVES\\_\\_Melina\\_Amoni\\_Silveira.\\_Mapeamento\\_da\\_vulnerabilidade\\_%C3%A0\\_mudan%C3%A7a\\_do\\_clima\\_em\\_Uberl%C3%A2ndia\\_-\\_Minas\\_Gerais\\_\\_orienta%C3%A7%C3%B5es\\_para\\_a\\_adapta%C3%A7%C3%A3o.pdf](https://cb27.s3.amazonaws.com/2__ALVES__Melina_Amoni_Silveira._Mapeamento_da_vulnerabilidade_%C3%A0_mudan%C3%A7a_do_clima_em_Uberl%C3%A2ndia_-_Minas_Gerais__orienta%C3%A7%C3%B5es_para_a_adapta%C3%A7%C3%A3o.pdf). Acesso em: 24 jul. 2024.
- AMBRIZZI, T. et al. The state of the art and fundamental aspects of regional climate modeling in South America. **Annals of the New York Academy of Sciences**, v. 1436, n. 1, p. 98–120, 31 jul. 2018. Acesso em 10 ago. 2023.
- ANDRADE, R. D. S. **O pensamento científico moderno: origem, desenvolvimento, limites e desafios**. *Perspectiva Filosófica*, v. 49, n. 2, p. 215, 3 maio 2022.
- ANSELIN, L. Local Indicators of Spatial Association-LISA. **Geographical Analysis**, v. 27, n. 2, p. 93–115, 3 set. 1995
- BARCELLOS, C. et al. Mudanças climáticas e ambientais e as doenças infecciosas: cenários e incertezas para o Brasil. **Epidemiologia e Serviços de Saúde**, v. 18, n. 3, p. 285–304, 1 set. 2009. Disponível em: [http://scielo.iec.gov.br/scielo.php?pid=S1679-49742009000300011&script=sci\\_abstract](http://scielo.iec.gov.br/scielo.php?pid=S1679-49742009000300011&script=sci_abstract). Acesso em: 12 ago. 2023
- BERNARDES, T. **Caracterização do ambiente agrícola do Complexo Serra Negra por meio de Sensoriamento Remoto e Sistemas de Informação Geográfica**. 2006. Dissertação – 2006. Disponível em: <http://repositorio.ufla.br/jspui/handle/1/3483>. Acesso em 02 jul. 2024
- BELAZREG, N.H. et al. Flood risk mapping using multi-criteria analysis (MCA) through AHP method case of El-Ham wadi watershed of Hodna basin (Algeria). **Natural Hazards**, v. 120, n. 2, p. 1023-1039, 2023.  
[https://idp.springer.com/authorize/casa?redirect\\_uri=https://link.springer.com/article/10.1007/s11069-023-06239-9&casa\\_token=knfWOvgo9eMAAAAA:EPB-WGa61pDmY779vR169229ZCJMJSOCipXMUr9KUFpmc7naewmFuml8pwfO05vqb9zFyp5aNHwDhk](https://idp.springer.com/authorize/casa?redirect_uri=https://link.springer.com/article/10.1007/s11069-023-06239-9&casa_token=knfWOvgo9eMAAAAA:EPB-WGa61pDmY779vR169229ZCJMJSOCipXMUr9KUFpmc7naewmFuml8pwfO05vqb9zFyp5aNHwDhk). Acesso em 16 mar. 2024
- BOHLE, H. G.; DOWNING, T. E.; WATTS, M. J. Climate change and social vulnerability. **Global Environmental Change**, v. 4, n. 1, p. 37–48, mar. 1994.

BÖRJESON, L. et al. Scenario types and techniques: Towards a user's guide. **Futures**, v. 38, n. 7, p. 723–739, set. 2006. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0016328705002132>. Acesso em: 01 jul. 2023

BUARQUE, S. C. **Metodologia e técnicas de construção de cenários globais e regionais**. www.ipea.gov.br, 1 fev. 2003. Acesso em: 24 jul. 2024.

CANIL, K. et al. Vulnerabilidades, riscos e justiça ambiental em escala macro metropolitana. **Mercator (Fortaleza)**, v. 20, p. e20003, 15 mar. 2021. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/mercator/a/zbBrtd9F963k7WCf8TWLRy/>. Acesso em 20 jul. 2024.

CAVALCANTE, C. M. Filosofia da ciência e metodologia econômica: do positivismo lógico ao realismo crítico. **Cad. Hist. Fil. Ci**, v. 1, n. 2, p. 38, 2015. Disponível em: <https://www.google.com/url?sa=t&source=web&rct=j&opi=89978449&url=https://www.cle.unicamp.br/eprints/index.php/cadernos/article/download/746/628/1389&ved=2ahUKEwiT3LTI7MCHAxVcLLkGHfX3D5MQFnoECBsQAQ&usg=AOvVaw1afQnJ9y4VjhGf8NzDTxUt>. Acesso em 9 jun 2024.

CAPP, E.; NIENOV, O. H. **Bioestatística Quantitativa Aplicada**. Porto Alegre, RS: UFRGS, 2020. p. 20

CAVALCANTI, E. R. **Vulnerabilidade de comunidades rurais diante da variabilidade climática no semiárido pernambucano: perspectiva de governança adaptativa dos recursos hídricos**. 2015. Dissertação – Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, 2015. Disponível em: <https://repositorio.ufpe.br/handle/123456789/17812>. Acesso em 18 jul. 2024.

CAMPOS, S. J. A. M.; STEFANI, F. L.; FACCINI, L. G.; BITAR, O. Y.. Mapeamento de áreas sujeitas à inundação para planejamento e gestão territorial: cartas de suscetibilidade, perigo e risco. **RBGEA - Revista Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental**, v.5, n.1, p.67-81, 2015. Acesso em 23 set. 2024.

CHAVES, M. DE Á. **Modelos digitais de elevação hidrologicamente consistentes para a Bacia Amazônica**. Tese – Doutorado em Ciência Florestal Universidade Federal de Viçosa, 2002. Disponível em: <https://www.google.com/url?sa=t&source=web&rct=j&opi=89978449&url=https://posciencia.florestal.ufv.br/wp-content/uploads/2023/05/Marcelo-de-Avila-Chaves.pdf&ved=2ahUKEwiD5aqp6sCHAxU9qZUCHZd8AIMQFnoECBkQAQ&usg=AOvVaw2S1mimA9fjZ8EfZytB9al2>. Acesso em: 11 jun. 2024

CHOU, S. C. et al. Assessment of Climate Change over South America under RCP 4.5 and 8.5 Downscaling Scenarios. **American Journal of Climate Change**, v. 03, n. 05, p. 512–527, 2014. Disponível em: <http://www.scirp.org/journal/paperinformation.aspx?paperid=52887>. Acesso em 13 jun. 2023

COMITÊ DE BACIA HIDROGRÁFICA RIO DAS VELHAS. Subcomitês. Disponível em: COMITÊ DE BACIA HIDROGRÁFICA RIO DAS VELHAS. Acesso em: 27 jul. 2023.

COMPANHIA DE PESQUISA DE RECURSOS MINERAIS – CPRM. **Projeto APA Sul RMBH: geomorfologia, mapa geomorfológico, escala 1:50.000 em 3 partes**. [S.l.]: SEMAD/CPRM, 2005.

- CONTI, J. B. Considerações sobre as mudanças climáticas globais. **Revista do Departamento de Geografia**, v. 16, p. 70–75, 2005. Disponível em: <https://www.revistas.usp.br/rdg/article/view/47286/51022>. Acesso em 16 mar. 2023
- CORSEUIL, C. W. **Técnicas de geoprocessamento e de análise de multicritérios na adequação de uso das terras**. Tese (doutorado) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrônômicas, 2006. Disponível em: <http://hdl.handle.net/11449/101716>. Acesso em 25 maio 2024
- CUTTER, S. L.; BORUFF, B. J.; W. LYNN SHIRLEY. Social Vulnerability to Environmental Hazards. **Social Science Quarterly**, v. 84, n. 2, p. 242–261, 2003.
- CUTTER, S. L.; FINCH, C. Temporal and spatial changes in social vulnerability to natural hazards. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 105, n. 7, p. 2301–2306, 11 fev. 2008.
- DA CUNHA, D. A.; DOS REIS, D. I. Efeitos das mudanças climáticas no setor agrícola do estado de Minas Gerais. **Revista de Economia e Agronegócio**, v. 10, n. 3, 3 jun. 2015. Disponível em: . Acesso em: 14 jul. 2023.
- DAGNINO R, CARPI JUNIOR S. **Risco ambiental: conceitos e aplicações. CLIMEP Climatologia e Estudos da Paisagem**. 2007;2(2):50-87. [www.tinyurl.com/y2bz5otc](http://www.tinyurl.com/y2bz5otc). Acesso em 05 maio 2023
- DALAGNOL, R. et al. Extreme rainfall and its impacts in the Brazilian Minas Gerais state in January 2020: Can we blame climate change? **Climate Resilience and Sustainability**, v. 1, n. 1, 14 ago. 2021. Acesso em 28 abr. 2023
- DALFI, R. L.; SANTOS, A. R. dos; CAMPOS, R. F. de; MOREIRA, T. R.; EUGENIO, F. C.; SANTOS, G. M. A. D. A. dos. Cenários distintos para o mapeamento de áreas de inundação nos bairros do município de Alegre, ES. **Cadernos de Geociências, [S. l.]**, v. 10, n. 2, p. 76–86, 2013. Disponível em: <https://periodicos.ufba.br/index.php/cadgeoc/article/view/6991>. Acesso em: 27 jul. 2023.
- DEBORTOLI, N. S. et al. An index of Brazil’s vulnerability to expected increases in natural flash flooding and landslide disasters in the context of climate change. **Natural Hazards**, v. 86, n. 2, p. 557–582, 4 jan. 2017. Acesso em 19 mai 2023
- EMRICH, C. T.; CUTTER, S. L. Social Vulnerability to Climate-Sensitive Hazards in the Southern United States. **Weather, Climate, and Society**, v. 3, n. 3, p. 193–208, jul. 2011.
- FÁVERO, L. P.; BELFIORE, P. **Manual de Análise de Dados**. [S.l.]: Elsevier Brasil, 2017.
- FERREIRA, B. C. C.; VALVERDE, M. C. Análise dos índices de Extremos de Precipitação em Cenários Futuros na Bacia do Rio Ribeira de Iguape - São Paulo. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 37, n. 1, p. 41–55, 2022.
- FERREIRA C., MONTEIRO, A., MADUREIRA, H. Percepção de risco climático: Uma análise para a cidade de Porto-Portugal Juiz de Fora-Brasil. **Revista de Geografia**, v.9, n.1, Juíz de Fora, MG. 2019
- FIGUEIREDO FILHO, D. B.; SILVA JÚNIOR, J. A. Visão além do alcance: uma introdução à análise fatorial. **Opinião Pública**, [S. l.], v. 16, n. 1, p. 160–185, 2015. Disponível em: <https://periodicos.sbu.unicamp.br/ojs/index.php/op/article/view/8641349>. Acesso em: 26 nov. 2023.

- FILHO, S.; CASTILHO, V. Análise comparativa da modelagem para mapeamento de suscetibilidade à inundação, nas sub-bacias Rio da Prata do Mendanha e Campinho, município do Rio de Janeiro. **Revista Tamoios/Revista tamoios**, v. 19, n. 2, p. 4–23, 26 jul. 2023.
- Freiman, F. P., & Carvalho, C. de O. (2020). Modelagem espacial de áreas suscetíveis a inundações baseada em um modelo multicritério híbrido e Sistema de Informação Geográfica: um estudo de caso aplicado a bacia do Rio Bengalas. *Revista Brasileira De Geografia Física*, 13(3), 1145–1161. <https://doi.org/10.26848/rbgf.v13.3.p1145-1161>
- GREENE, R. et al. GIS-Based Multiple-Criteria Decision Analysis. **Geography Compass**, v. 5, n. 6, p. 412–432, jun. 2011.
- GUTJAHR, O. et al. Max Planck Institute Earth System Model (MPI-ESM1.2) for the High-Resolution Model Intercomparison Project (HighResMIP). **Geoscientific Model Development**, v. 12, n. 7, p. 3241–3281, 25 jul. 2019.
- HAIR, J. F. et al. **Análise multivariada de dados**. 5. ed. Porto Alegre: Bookman, 2005.
- HEIJDEN, K. van D. **Scenarios: the art of strategic conversation**. 2. ed. West Sussex: John Wiley & Sons Ltd, 2005. 382 p. Disponível em: [http://www.untag-smd.ac.id/files/Perpustakaan\\_Digital\\_1/CREATIVE%20THINKING%20Scenarios,%20The%20art%20of%20strategic%20conversation.pdf](http://www.untag-smd.ac.id/files/Perpustakaan_Digital_1/CREATIVE%20THINKING%20Scenarios,%20The%20art%20of%20strategic%20conversation.pdf). Acesso em: 27 jul. 2023.
- HOGAN, D. J.; MARANDOLA Jr., E. (Orgs.). **População e mudança climática: dimensões humanas das mudanças ambientais globais**. Campinas: Núcleo de Estudos de População (NEPO/UNICAMP), 2009, 292 p. ISBN 978 85-88258-12-9
- IDE SISEMA. **Infraestrutura de Dados Espaciais IDE SISEMA**. Disponível em: <https://idesisema.meioambiente.mg.gov.br/webgis>. Acesso em: 27 jul. 2023
- IPCC. **Climate Change 2007: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change** Core Writing Team, Pachauri, R.K and Reisinger, A. (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 104 pp. 2007
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). Summary for Policymakers. In: STOCKER, T.F.; QIN, D.; PLATTNER, G.K.; TIGNOR, M.; ALLEN, S.K.; BOSCHUNG, J.; NAUELS, A.; XIA, Y.; BEX, V.; MIDGLEY, P.M. (Eds). **Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. Cambridge, U.K. and New York, USA: Cambridge University Press, 2014, 27 pp
- IPCC. **Climate Change 2021 Working Group I contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. [s.l.] IPCC, 2021. Disponível em: [https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC\\_AR6\\_WGI\\_SPM.pdf](https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WGI_SPM.pdf). Acesso em 03 mar 2023.
- JUNGES, A. L.; SANTOS, Y.; MASSONI, N. T. Efeito estufa e aquecimento global: uma abordagem conceitual a partir da física para educação básica. **Experiências em ensino de ciências**, v. 13, n. 5, p. 126–151, 3 dez. 2018. Acesso em: 24 jul. 2024.
- KAPLUNOVSKY, A.S. **Why using factor analysis?** (Dedicated to the centenary of factor analysis). [Online] disponível em: <http://www.magniel.com/fa/kaplunovsky.pdf>. Acesso em 17 out. 2023.

Krempi, A. P. **Explorando recursos de estatística espacial para análise da acessibilidade na cidade de Bauru**. São Carlos, 2004

LAMOUNIER, W. L.; CARVALHO, V. L. M.; SALGADO, A. A. R.; MARENT, B. R. A influência da litologia na distribuição da cobertura vegetal e no uso do solo na Serra do Gandarela, Quadrilátero Ferrífero - MG. **Revista Geografias**, [S. l.], v. 6, n. 1, p. 152–165, 2010. DOI: 10.35699/2237-549X.13289. Disponível em:

<https://periodicos.ufmg.br/index.php/geografias/article/view/13289>. Acesso em: 17 jul. 2023.

LÖBLER, MA. LEODIR; HOPPEN, NOBERTO; ESTIVALETE, VÂNIAS DE F. BARROS. A Teoria da Imagem como Explicação para a Atribuição de Pesos em Critérios de Decisão. **R. bras. Gest. Neg.**, v. 10, n. 28, 2008. Disponível em:

[https://www.google.com/url?sa=t&source=web&rct=j&opi=89978449&url=https://rbgn.fecap.br/RBGN/article/download/100/391/1775&ved=2ahUKEwj3x\\_y27cCHAxXEIJUCHc0qDDoQFnoECAoQAQ&usg=AOvVaw1dla1znhmKUtxTmjAPsDmp](https://www.google.com/url?sa=t&source=web&rct=j&opi=89978449&url=https://rbgn.fecap.br/RBGN/article/download/100/391/1775&ved=2ahUKEwj3x_y27cCHAxXEIJUCHc0qDDoQFnoECAoQAQ&usg=AOvVaw1dla1znhmKUtxTmjAPsDmp). Acesso em 15 jul 2024.

LUZARDO, A. J.R., FILHO, R.M.C., RUBIM, I.B. análise espacial exploratória com o emprego do Índice De Moran. **GEographia** Niterói, Universidade Federal Fluminense ISSN 15177793 (eletrônico) Vol.19, No40, 2017

MACHADO, L. A. **Análise das relações superfície-atmosfera na bacia hidrográfica do Rio das Velhas em uma perspectiva multiescala**. 2021. 220 f. Tese (Doutorado) - Curso de Geografia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2021.

MALCZEWSKI, J. GIS-based multicriteria decision analysis: a survey of the literature.

**International Journal of Geographical Information Science**, v. 20, n. 7, p. 703–726, ago. 2006

MATOS, D. A. S.; RODRIGUES, E. C. **Análise Fatorial**. Brasília, DF: Enap Fundação Escola Nacional de Administração Pública, 2019. p. 74

MARCOS JUNIOR, A. D. **Análise dos cenários de mudanças climáticas do IPCC-AR5 para o Brasil: impactos no clima e energia**. 2017. 73 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia de Energia, Instituto de Engenharias e Desenvolvimento Sustentável, Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-brasileira, Acaraé-Ceara, 2017.

MAROUN, M. R. **Adaptação às mudanças climáticas: uma proposta de Documento de Concepção de Projeto (DCP) no âmbito do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL)**. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007.

MARTH, J. D.; MOURA, N. S. V.; KOESTER, E. Estudo da suscetibilidade à inundação com base em análise geomorfológica, bacia hidrográfica do arroio santa isabel, região costeira do Rio Grande do Sul, Brasil. **Revista do Instituto Geológico**, v. 37, n. 1, 2016. Acesso em: 18 jun. 2022.

MARTINS, R. D.; FERREIRA, L. DA C. Uma revisão crítica sobre cidades e mudança climática: vinho velho em garrafa nova ou um novo paradigma de ação para a governança local? **Revista de Administração Pública**, v. 45, n. 3, p. 611–641, jun. 2011. Acesso em: 8 nov. 2021.

MARTINS, R. D.; FERREIRA, L. DA C. VULNERABILIDADE, adaptação e risco no contexto das mudanças climáticas. **Mercator**, v. 11, n. 26, p. 237–251, 19 dez. 2012. Acesso em: 22 abr. 2022.

MENDONÇA, F. Riscos e vulnerabilidades socioambientais urbanos a contingência climática. **Mercator**, v. 9, n. 1, p. 153–163, 1 jan. 2010. Acesso em: 24 jul. 2024.

MENEZES, J. A. et al. Mapping human vulnerability to climate change in the Brazilian Amazon: The construction of a municipal vulnerability index. **PLOS ONE**, v. 13, n. 2, p. e0190808, 14 fev. 2018.

MIRANDA, N. M. G. et al. Hierarchical Analytical Process (AHP) in Spatial Modeling of Flood Vulnerability in Mixed Environments. **Anuário do Instituto de Geociências - UFRJ**, v. 42, n. 4, p. 172–181, 12 dez. 2019

MONTEIRO, C. A. F. **O clima e a organização do espaço no Estado de São Paulo: problemas e perspectivas**. São Paulo, IGEOG / USP, 1976. (Série Teses e Monografias, 28)

MOURA, A.C.M. Reflexões metodológicas como subsídio para estudos ambientais baseados em Análises de Multicritérios. In: **ANAIS XIII SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO**, Florianópolis, Brasil, INPE, p. 2899-2906.2007

MOURA, A. C. M.; JANKOWSKI, P. L. Contribuições aos estudos de análises de incertezas como complementação às análises multicritérios - “sensitivity analysis to suitability evaluation”. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 68, n. 4, 26 out. 2016. Acesso em: 10 abr. 2023.

NAITZEL, L. **Validação de modelos climáticos globais e análise de projeções futuras para o Rio Grande do Sul**. 2021. Trabalho de Conclusão de Curso – Curso de Engenharia Ambiental Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2021. Disponível em: <http://hdl.handle.net/10183/231335>. Acesso em 5 mar. 2024.

NASCIMENTO JÚNIOR, L. O clima urbano como risco climático. **Geo UERJ**, n. 34, p. e40956, 15 abr. 2019. Acesso em: 24 jul. 2024.

NAYLOR, A. et al. Conceptualizing Climate Vulnerability in Complex Adaptive Systems. **One Earth**, v. 2, n. 5, p. 444–454, maio 2020. Disponível em: [https://www.cell.com/one-earth/pdf/S2590-3322\(20\)30198-6.pdf](https://www.cell.com/one-earth/pdf/S2590-3322(20)30198-6.pdf). Acesso em 17 nov. 2023.

NÉMETH, B. et al. Comparison of weighting methods used in multicriteria decision analysis frameworks in healthcare with focus on low- and middle-income countries. **Journal of Comparative Effectiveness Research**, v. 8, n. 4, p. 195–204, mar. 2019. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/30767661/>. Acesso em 11 jul 2024.

NOBRE, C. A. Mudanças climáticas e o Brasil: contextualização, **Parcerias Estratégicas**, v. 13, n. 27, p. 7-18, 2008

NOBRE, C. A. et al. **Vulnerabilidades das Megacidades Brasileiras às Mudanças Climáticas**: Região Metropolitana de São Paulo. São Paulo, 32 p, 2010.

NOBRE, C. A. et al. Some Characteristics and Impacts of the Drought and Water Crisis in Southeastern Brazil during 2014 and 2015. **Journal of Water Resource and Protection**, v. 08, n. 02, p. 252–262, 2016.

OBERMAIER, M.; ROSA, L. P. Mudança climática e adaptação no Brasil: uma análise crítica. **Estudos Avançados**, v. 27, n. 78, p. 155–176, 2013. Acesso em: 13 mar. 2020.

ODU, G. O. Weighting Methods for multi-criteria Decision-Making Technique. **Journal of Applied Sciences and Environmental Management**, v. 23, n. 8, p. 1449, 11 set. 2019.

Disponível em: <https://www.ajol.info/index.php/jasem/article/view/189641>. Acesso em 15 jun 2024.

OLIVEIRA, T. A. De. **O clima urbano como risco climático: os impactos das chuvas em Juiz de Fora- no período de 1980-2018**. Mestrado, Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, 2021. Disponível em: <https://repositorio.ufjf.br/jspui/handle/ufjf/12653>. Acesso em: 14 jul. 2023.

PINTO, R. C. **Identificação E Mapeamento De Áreas Suscetíveis A Movimentos De Massa Através Da Avaliação Multicritério Em Sistemas De Informações Geográficas – Análise Conceitual E Uma Proposta Metodológica**. 213p. Ufpr. Curitiba, Paraná, 2015.

PINTO, S. V. **Vulnerabilidade climática dos setores socioeconômicos dependentes do uso da água no Médio Paraíba do Rio de Janeiro frente às mudanças climáticas**. 2019. 51 f. Dissertação (Mestrado em Práticas em Desenvolvimento Sustentável) - Instituto de Florestas, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro. Seropédica, RJ, 2019.

PORTO, D. **Quatro mil pessoas estão desalojadas após chuvas em Nova Lima (MG), diz prefeito**. CNN. São Paulo, SP. 11 de jan de 2022. Disponível em: <https://www.cnnbrasil.com.br/nacional/quatro-mil-pessoas-estao-desalojadas-apos-chuvas-em-nova-lima-mg-diz-prefeito/> Acesso em 22 de abr de 2022.

RAMMÊ, R. S. A política da justiça climática: conjugando riscos, vulnerabilidades e injustiças decorrentes das mudanças climáticas. **Revista de Direito Ambiental**, v. 65, p. 367, 2012.

RÄSÄNEN, A. et al. Climate change, multiple stressors and human vulnerability: a systematic review. **Regional Environmental Change**, [S.l.], v. 16, n. 8, p.2291-2302, maio 2016. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1007/s10113-016-0974-7>. Acesso em: 27 de jun de 2023.

RAMOS, J. R. L. .; ELMIRO, M. A. T. .; NERO, M. A.; TEMBA, P. da C. .; ROSA, G. Lógica fuzzy associada ao risco de inundação no município de Nova Lima/MG. **Revista Geografias**, [S. l.], v. 14, n. 2, p. 125–144, 2022. DOI: 10.35699/2237-549X.2018.19369. Disponível em: <https://periodicos.ufmg.br/index.php/geografias/article/view/19369>. Acesso em: 10 jul. 2024.

RIBEIRO JÚNIOR, C. J. Avaliação da habilidade de modelos de previsão numérica de tempo baseada em diagramas estatísticos. São José dos Campos: INPE, 2017. Disponível em: [http://mtc-m21c.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/mtc-m21c/2020/06.05.20.08/doc/ribeiro%20junior\\_avaliacao.pdf](http://mtc-m21c.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/mtc-m21c/2020/06.05.20.08/doc/ribeiro%20junior_avaliacao.pdf). Acesso em 18 jul. 2024.

RIBOT, J. **Vulnerability does not just fall from the sky Addressing the vulnerability conundrum**, in KASPERSON, R. E. Risk Conundrums. [s.l: s.n.]. 2017

ROY, P. et al. Effects of climate change and sea-level rise on coastal habitat: Vulnerability assessment, adaptation strategies and policy recommendations. **Journal of Environmental Management**, v. 330, p. 117187, 15 mar. 2023. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301479722027608>. Acesso em 12 nov. 2023.

SANTOS, J.O. Relações entre fragilidade ambiental e vulnerabilidade social na vulnerabilidade aos ricos. **Mercator**, Fortaleza, v.14, n.2, p.75,maio./agos.2015

São Paulo (Estado): Secretaria de Meio Ambiente, Infraestrutura e Logística. **Guia para a elaboração de planos de adaptação e resiliência climática**. 2ª ed. - - São Paulo, SEMIL. 2023

SATHLER, D.; PAIVA, J. C.; BAPTISTA, S. Cidades e Mudanças Climáticas: planejamento urbano e governança ambiental nas sedes das principais regiões metropolitanas e regiões integradas de desenvolvimento / Cities and Climate Change: urban planning and environmental governance in the central municipalities of Brazil's leading metropolitan regions and integrated development regions. **Caderno de Geografia**, v. 29, n. 56, p. 262, 2019.

SCHOEMAKER, P. **Scenario planning: a tool for strategic thinking**. Long Range Planning, v. 28, n. 3, p. 117, jun. 1995.

Sete Soluções e Tecnologia Ambiental Ltda. **Projeto Plancon –Plano de Contingência Municipal Nova Lima/MG** Relatório de Mapeamento de áreas de risco. Nova Lima, 2021

SILVA, F. F. D. **Métodos de elicitación de pesos para modelos de apoio multicritério à decisão**. Dissertação de Mestrado – Pós-Graduação em Engenharia de Produção, da Universidade Candido Mendes, 2018. Disponível em: <https://pep.ucam-campos.br/wp-content/uploads/2018/03/Fabr%C3%ADcio-Freitas-da-Silva.pdf>. Acesso em: 28 mai 2024.

SILVEIRA, R. D. Risco climático e vulnerabilidade socioespacial: o exemplo dos eventos extremos relacionados ao calor e ao frio (climate risk and sociospatial vulnerability: example of events related to extreme heat and cold). **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 19, 17 out. 2016. Acesso em: 26 maio 2022.

SINGHA A et al. Implication of Applying IPCC AR4 and AR5 Framework for Drought-based Vulnerability and Risk Assessment in Bankura and Purulia Districts, West Bengal. Iop Conference Series: **Earth and Environmental Science**, [S.L.], v. 1164, n. 1, p. 012009, 1 abr. 2023. IOP Publishing. <http://dx.doi.org/10.1088/1755-1315/1164/1/012009>. Acesso em 06 mai. 2024.

SIMÕES, P. M. L.; CONCEIÇÃO, R. A. C. Metodologia de modelagem de inundação utilizada nas cartas de suscetibilidade. In: **ENCONTRO NACIONAL DE DESASTRES, 2020, Online. Anais [...]**. Online: End, 2020. p. 1-4. Disponível em: <https://files.abrhidro.org.br/Eventos/Trabalhos/133/II-END0073-1-20201015-094830.pdf>. Acesso em: 27 jul. 2023

SOARES, W. **Cenários de Mudanças Climáticas**. Disponível em: [https://impactoclima.ufes.br/sites/impactoclima.ufes.br/files/field/anexo/cenarios\\_de\\_mudancas\\_climaticas\\_rcp\\_ssp\\_0.pdf](https://impactoclima.ufes.br/sites/impactoclima.ufes.br/files/field/anexo/cenarios_de_mudancas_climaticas_rcp_ssp_0.pdf). Acesso em: 27 jul. 2023

**Sobe para 22 o número de mortos durante o período chuvoso em Minas Gerais.**

Disponível em: <https://www.agenciaminas.mg.gov.br/noticia/sobe-para-22-o-numero-de-mortos-durante-o-periodo-chuvoso-em-minas-gerais>. Acesso em: 27 jul. 2023.

SOUZA at. al. (2020) - **Reconstructing Three Decades of Land Use and Land Cover Changes in Brazilian Biomes with Landsat Archive and Earth Engine** - Remote Sensing, Volume 12, Issue 17, 10.3390/rs12172735

SILVA, L. de O., & WIDMER, W. M. (2021). Informações ecossistêmicas e climáticas para a gestão de unidades de conservação: um estudo de caso sobre o Parque Natural Municipal Serra de São Miguel / Ecosystem and climate information for the management of protected areas: a case study on the “Serra de São Miguel” municipal Park. **Brazilian Journal of**

**Development**, 6(12), 104199–104222. <https://doi.org/10.34117/bjdv6n12-789>. Acesso em 29 mar. 2024.

SILVEIRA, R. D. **Risco climático, vulnerabilidade socioespacial e eventos climáticos extremos relacionados ao calor e ao frio no estado do Rio Grande do Sul- Brasil**. 2014. 377 p. Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências e Tecnologia, 2014. Disponível em: <http://hdl.handle.net/11449/115959>.

TUCCI, C. Gerenciamento da Drenagem Urbana. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 7, n. 1, p. 5–27, 2002.

VEYRET, Y. (org.). **Os riscos: o homem como agressor e vítima do meio ambiente**. São Paulo: Contexto, 2007.

WANG, L. & H. LIU (2006): An efficient method for identifying and filling surface depressions in digital elevation models for hydrologic analysis and modelling. **International Journal of Geographical Information Science**, Vol. 20, No. 2: 193-213.

WATTS, M. J.; BOHLE, H. G. Hunger, famine and the space of vulnerability. **GeoJournal**, v. 30, n. 2, p. 117–125, jun. 1993.

WISNER, B.; AL, E. **At risk: natural hazards, people's vulnerability and disasters**. London: Routledge, 2008.

WU, R. M. X. Which Objective Weight Method Is Better: PCA or Entropy? **Scientific Journal of Research & Reviews**, v. 3, n. 2, 15 mar. 2022.

YIN, R. K. **Estudo de caso**. [s.l.] Porto Alegre Bookman, 2003.

## APÊNDICE - Perigos e Impactos

Perigo é o elemento que tem potencial de causar mal ou danos ao ser humano ou promover danos ao meio ambiente. Para Almeida (2010) existe uma confusão entre as noções do risco com a noção do próprio evento que causa a ameaça e perigo. Para a autora, perigo é a possibilidade ou ocorrência do fenômeno perigoso em si, como por exemplo, chuvas.

Almeida (2010) traz um exemplo que tem grande capacidade de elucidar a diferenciação entre risco e perigo: Duas pessoas cruzando o oceano, uma em um transatlântico e outra no barco a remo. O perigo (águas profundas e grande ondas) é o mesmo para ambos, mas o risco (probabilidade de naufrágio e afogamento) é maior para aquele que está no barco a remo.

O perigo traz em si a característica de catalisar danos, prejuízos, vítimas ou outros impactos (NASCIMENTO JÚNIOR, 2019; IPCC, 2021). Oliveira (2021) relaciona este fato com a ocorrência de eventos extremos, posto que estes não permitem uma previsão assertiva.

IPCC (2021) traz como perigos climáticos observados para a porção sudeste da América do Sul, apresentados na Figura 21:

- Aumento na temperatura média do ar;
- Aumento de eventos de onda de calor;
- Aumento na precipitação média;
- Aumento nos eventos extremos de chuva;
- Queda nas ondas de frio e geada;
- Aumento e queda nos eventos de seca e aridez;
- Aumento nos eventos de inundação e deslizamentos.

Os perigos climáticos previstos pelo relatório (considerando os cenários de emissão CP4.5, SSP3-4.5 e SRES A1B) são

- Aumento da intensidade e frequência de ondas de calor (alta confiabilidade)
- Queda na intensidade e frequência de ondas de frio (alta confiabilidade);
- Aumento anual nos índices de precipitação (alta confiabilidade) e intensificação em eventos extremos de chuva (média confiabilidade);
- Elevação nos eventos de enchentes e deslizamentos (média confiabilidade);
- Tendências crescentes na temperatura média do ar (alta confiabilidade)

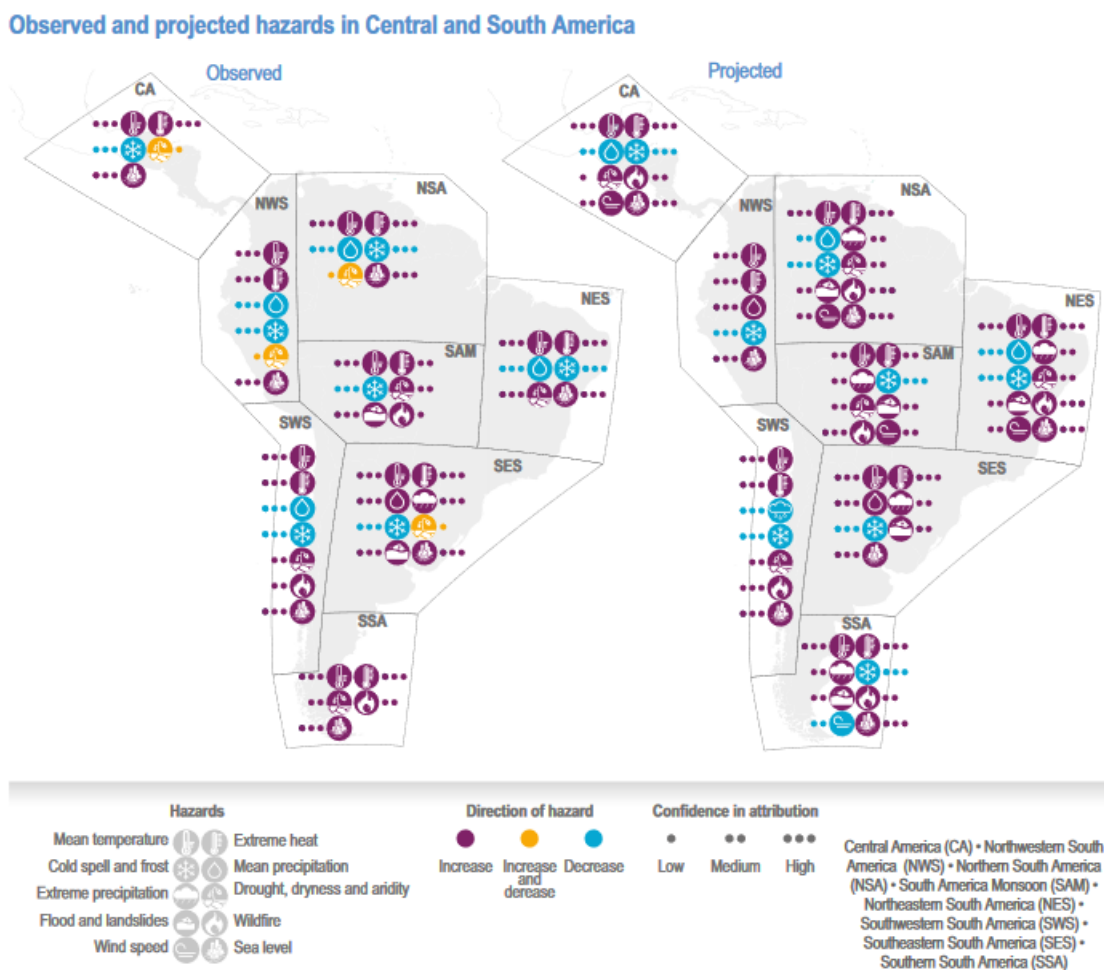


Figura 21 Impactos observados e projetados na América do Sul. Fonte: IPCC, 2021.

A ocorrência dos perigos leva a impactos, ou seja, consequências. Dentre eles, o aumento da frequência na ocorrência de chuvas extremas no estado de Minas Gerais, como as ocorridas no ano de 2020, que levaram a morte de 56 pessoas e inúmeras pessoas desabrigadas, além de prejuízos materiais (DALAGNOL et al, 2022).

IPCC (2021) cita que apesar do aumento na quantidade de chuva na região sudeste do Brasil, entre 2014 e 2016 esta região enfrentou uma significativa crise hídrica. Além disso, períodos de seca se tornaram mais frequentes nessa região. (NOBRE et al, 2016) Em Minas Gerais, especificamente, houve impacto na agricultura, afetando a produção de alimentos e a vida rural. (DA CUNHA E DOS REIS, 2015)

Outros impactos são o aumento do preço de comida, aumento no preço da eletricidade e o aumento em 150% nos incêndios florestais (IPCC, 2021)). O aumento de ondas de calor implica no aumento da energia elétrica para climatização artificial.

Chama-se atenção para os impactos na saúde humana. Para Barcellos et al (2009) a saúde humana é impactada de diversas maneiras, através do aumento na ocorrência de doenças respiratórias, ocasionado entre outros motivos, pela queda na qualidade do ar. Bem como o aumento na ocorrência de doenças de veiculação hídrica, como esquistossomose, e o espalhamento de doenças transmitidas por vetores, como a dengue, malária e leishmanioses. Outro impacto é o aumento de hospitalizações relacionadas às altas temperaturas e elevadas concentrações de poluentes. Para os autores a relação entre temperatura e material poluente também pode ser considerada fator de risco para doenças cardíacas.

Deve-se considerar os impactos que incidem sobre os ecossistemas naturais, como a queda na biodiversidade da mata atlântica e do cerrado (biomas presentes na área de estudo) e nas provisões de serviços ecossistêmicos. (SILVA E WIDMER, 2019)

Para IPCC (2021), os impactos observados na porção sudeste da América do Sul, dentre outros, ocorreram em:

- Serviços ecossistêmicos de florestas tropicais, lagos, rios e áreas inundáveis;
- Aquíferos e águas subterrâneas;
- Vazão de recursos hídricos;
- Qualidade da água;
- Sistemas de rodízio de lavouras;
- Lavouras permanentes;
- Solo urbano e ambiente construído;
- Abastecimento de água, drenagem pluvial e sistemas de esgoto;
- Taxas de morbidade e mortalidade;
- Fluxos migratórios
- Conflitos.