



O Contributo das Tecnologias de Informação Geográfica na Análise da Vulnerabilidade Sísmica

Estudo-Caso da Cidade de Lisboa

Carolina Marques Cordeiro

Dissertação

apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Ciência e Sistemas de Informação
Geográfica

NOVA Information Management School
Instituto Superior de Estatística e Gestão de Informação
Universidade Nova de Lisboa

NOVA Information Management School
Instituto Superior de Estatística e Gestão de Informação
Universidade Nova de Lisboa

**O CONTRIBUTO DAS TECNOLOGIAS DE INFORMAÇÃO GEOGRÁFICA NA ANÁLISE DA
VULNERABILIDADE SÍSMICA**

Estudo-Caso da Cidade de Lisboa

por

Carolina Marques Cordeiro

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em
Ciência e Sistemas de Informação Geográfica

Orientada por:

Marco Otávio Trindade Painho, PhD, NOVA Information Management School

Julho, 2025

DECLARAÇÃO DE INTEGRIDADE

1. Assinatura digital

Declaro que o trabalho contido neste documento é da minha autoria e não de outra pessoa. Toda a assistência recebida de outras pessoas está devidamente identificadas e é efetuada referência a todas as fontes utilizadas (publicadas ou não).

O trabalho não foi anteriormente submetido ou avaliado na NOVA Information Management School ou em qualquer outra instituição. Declaro ainda que tenho conhecimento das Regras de Conduta e do Código de Honra da NOVA Information Management School.

UTILIZAÇÃO DE INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL GENERATIVA

Tarefas	NÃO	SIM	Ferramentas de Inteligência Artificial Generativa
Compreender melhor as questões relacionadas com a investigação	X		
Resumir texto de bibliografia / recursos		X	Scispace
Resumo do(s) método(s) utilizado(s)		X	Consensus
Tradução de texto		X	DeepL Translate
Verificação gramatical		X	Paperpal e ChatGPT
Parafrasear ou reescrever texto de outras pessoas/recursos		X	Paperpal e ChatGPT
Codificação em R, Python, etc.	X		
Obter ajuda sobre um software	X		
Criação e edição de imagens, mapas, vídeos, etc.	X		
Análise de dados	X		
Especificar abaixo outras tarefas não mencionadas acima:			
Relacionar bibliografia / recursos		X	Litmaps e Scite_

AGRADECIMENTOS

Gostaria de começar por agradecer a todas as pessoas com quem me cruzei ao longo deste percurso: com quem conversei, troquei ideias, ou simplesmente partilhei dúvidas. Cada contributo, por mais discreto que tenha sido, deixou a sua marca neste trabalho.

Um agradecimento muito especial ao Professor Doutor Marco Painho, coordenador do curso e orientador desta dissertação. Foi um privilégio poder contar com a orientação de alguém que, desde o início, se mostrou disponível, atento e rigoroso. Agradeço pelas sugestões sempre objetivas, pela prontidão nas respostas, e por me ter ajudado a desbloquear ideias.

A todos os docentes que fizeram parte do meu percurso na NOVA IMS, expresso o meu reconhecimento pelos conhecimentos e competências transmitidas que me permitiram chegar até aqui. À instituição, agradeço o ambiente académico e os recursos que viabilizaram esta investigação.

Entre os encontros que este percurso me proporcionou, agradeço de forma especial à Cristina, ao Gonçalo e ao João, colegas de mestrado com quem partilhei trabalhos, reflexões e até incertezas. O apoio mútuo e a troca de ideias foram fundamentais – não só para este trabalho, mas para o crescimento coletivo ao longo do curso. Aprendemos juntos, e isso ficará como uma das partes mais gratificantes desta etapa.

À minha família, o meu profundo obrigada pela paciência e motivação constante, mesmo quando faltavam as palavras. Em especial, aos meus pais e à minha irmã Matilde, que estiveram sempre por perto, com gestos que me ajudaram a continuar mesmo nos dias mais difíceis.

Aos meus amigos, por estarem lá, na presença, na ausência ou na insistência para sair quando eu já não conseguia ver com clareza. À Raquel, à Mariana, à Francisca e ao Rafael, obrigada por me lembrarem que parar, respirar e rir também faz parte do caminho. A vossa amizade foi essencial para manter o equilíbrio entre a dedicação e o cuidado comigo mesma.

Este trabalho é também vosso.

O CONTRIBUTO DAS TECNOLOGIAS DE INFORMAÇÃO GEOGRÁFICA NA ANÁLISE DA VULNERABILIDADE SÍSMICA

Estudo-Caso da Cidade de Lisboa

RESUMO

Nas últimas décadas, a cidade de Lisboa tem-se revelado particularmente vulnerável ao risco sísmico, fruto da sua elevada densidade populacional, ocupação intensa do solo e a memória histórica do Terramoto de 1755. Neste contexto, a presente dissertação tem como objetivo demonstrar o contributo das Tecnologias de Informação Geográfica (TIG) — nomeadamente dos Sistemas de Informação Geográfica (SIG) e a Detecção Remota (DR) — para a análise e gestão do risco sísmico. Recorrendo ao Processo Analítico Hierárquico (AHP), é desenvolvido um modelo de vulnerabilidade sísmica que integra variáveis físicas e humanas, aplicável ao concelho de Lisboa. A análise espacial, suportada por dados oficiais abertos, inclui informação sobre população, edificado, características do solo, acessibilidade a serviços de emergência e suscetibilidade a tsunamis. Os resultados permitem identificar padrões espaciais de vulnerabilidade, com destaque para zonas históricas e ribeirinhas, apontando a necessidade de estratégias de mitigação e planeamento mais ajustadas às especificidades do território.

PALAVRAS-CHAVE

Análise Multicritério; Detecção Remota; Processo Analítico Hierárquico; Sistemas de Informação Geográfica; Vulnerabilidade sísmica.

Objetivos do Desenvolvimento Sustentável (ODS):



THE CONTRIBUTION OF GEOGRAPHIC INFORMATION TECHNOLOGIES IN ANALYSING SEISMIC VULNERABILITY

Lisbon City Case Study

ABSTRACT

In recent decades, the city of Lisbon has been particularly vulnerable to seismic risk, due to its high population density, intense land occupation and historical memory of the 1755 earthquake. In this context, this dissertation aims to demonstrate the contribution of Geographic Information Technologies (GIT) - namely Geographic Information Systems (GIS) and Remote Sensing (RS) - to analysing and managing seismic risk. Using the Analytic Hierarchy Process (AHP), a seismic vulnerability model is developed that integrates physical and human variables, applicable to the municipality of Lisbon. The spatial analysis, supported by open official data, includes information on population, buildings, soil characteristics, accessibility to emergency services and susceptibility to tsunamis. The results identify spatial patterns of vulnerability, particularly in historic and riverside areas, pointing to the need for mitigation and planning strategies that are better suited to the specific characteristics of the territory.

KEYWORDS

Analytical Hierarchy Process; Geographic Information Systems; Multicriteria Analysis; Remote Sensing; Seismic Vulnerability.

Sustainable Development Goals (SGD):



ÍNDICE

DECLARAÇÃO DE INTEGRIDADE	ii
AGRADECIMENTOS	iv
RESUMO	v
ÍNDICE DE FIGURAS.....	x
ACRÓNIMOS.....	xi
1. Introdução	1
2. Revisão da Literatura.....	4
2.1. Definição e Características dos Sismos	6
2.1.1. Perigo e Desastre Natural.....	7
2.1.1.1 Sismos.....	8
2.1.2. Risco, Perigo, Exposição, Vulnerabilidade.....	8
2.1.2.1 Vulnerabilidade e Suscetibilidade	10
2.1.3. Cadeia de Riscos Sísmicos - Conexão entre Conceitos.....	10
2.2. Tecnologias de Informação Geográfica na Gestão de Desastres Naturais	11
2.2.1. Sistemas de Informação Geográfica (SIG)	12
2.2.1.1. Aplicação dos SIG na Gestão de Desastres Naturais.....	13
2.2.1.2. Limitações dos SIG	14
2.2.2. Detecção Remota (DR).....	15
2.2.2.1. Aplicação da DR na Gestão de Desastres Naturais	16
2.2.2.2. Limitações da DR.....	18
2.3. Análise Multicritério na Avaliação de Risco Sísmico	19
2.3.1. Processo Analítico Hierárquico	20
2.4. Variáveis-Chave na Avaliação da Vulnerabilidade Sísmica	23
3. Metodologia.....	27
3.1. Caso de Estudo: Concelho de Lisboa	27
3.2. Método AHP	29
3.2.1. Seleção e Recolha de Dados	32
3.2.2. Organização Hierárquica do Modelo de Vulnerabilidade	33
3.2.2.1. Critério 1: Demografia	36
3.2.2.2. Critério 2: Socioeconomia	37
3.2.2.3. Critério 3: Ambiente Construído	38
3.2.2.4. Critério 4: Solos	39
3.2.2.5. Critério 5: Acessibilidade e Segurança	39

3.2.2.6.Critério 6: Tsunami.....	40
3.2.3. Padronização dos Critérios de Vulnerabilidade	41
3.2.3.1.Espacial - Sistema de Coordenadas.....	41
3.2.3.2.Temática.....	42
a) Variáveis Não Censitárias	43
b) Variáveis Censitárias.....	45
3.2.4. Estimação dos Pesos dos Critérios de Vulnerabilidade.....	46
3.2.4.1.Adaptações Metodológicas dos Pesos.....	49
4. Estudo Empírico	52
4.1. Formulação e Contextualização do Problema.....	52
4.2. Hipóteses de Investigação	53
5. Resultados e Discussão	57
5.1. Cenário 1 - Sismo.....	57
5.2. Cenário 2 - Sismo seguido de Tsunami	60
5.3. Comparação entre cenários	63
5.4. Validação das Hipóteses.....	65
5.4.1. Hipótese 1	65
5.4.2. Hipótese 2.....	66
5.4.3. Hipótese 3.....	68
5.4.4. Hipótese 4.....	70
5.5. Síntese de Resultados	72
6. Conclusões e Investigação Futura	74
Referências Bibliográficas	78
Apêndice A: Fórmulas de Reclassificação e Conversão de Variáveis Censitárias	84
Apêndice B: Distribuição Espacial da Vulnerabilidade por Critério.....	87
Apêndice C: Procedimento Metodológico da Hipótese 1	88
Anexo A: Fontes e Acessos aos Dados do Estudo	89
Anexo B: Atribuição dos pesos de nível 3	90
Anexo C: Atribuição dos pesos de nível 2	98
Anexo D: Atribuição dos pesos de nível 1	100
Anexo E: Pesos atribuídos às Variáveis da Hipótese 1	101
Anexo F: Planta Topográfica Da Cidade Pós-Terramoto	101

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1 - Escala fundamental de Saaty.....	22
Tabela 2.2 - Índice de Consistência Aleatória Média de Saaty.....	23
Tabela 3.1 - Fontes de dados utilizadas na construção do modelo de vulnerabilidade sísmica de Lisboa.....	33
Tabela 3.2 - Sistemas de coordenadas originais das fontes de dados utilizadas no modelo de vulnerabilidade sísmica.....	42
Tabela 3.3 - Escala de classificação da vulnerabilidade sísmica	43
Tabela 3.4 - Pesos atribuídos aos Critérios de Vulnerabilidade Sísmica (níveis 2 e 3)	47
Tabela 3.5 - Pesos atribuídos aos Critérios de Vulnerabilidade Sísmica (níveis 2 e 3) (continuação)	48
Tabela 3.6 - Pesos atribuídos aos Critérios de Vulnerabilidade Sísmica (nível 1)	49
Tabela 5.1 - Síntese de Resultados: Cenários de Vulnerabilidade	73
Tabela 5.2 - Síntese de Resultados: Hipóteses	73

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 - Etapas e ferramentas utilizadas na Revisão de Literatura.	6
Figura 2.2 - Cadeia de Risco Sísmico	11
Figura 2.3 - Quadro-resumo dos principais critérios, subcritérios e variáveis utilizados na avaliação da vulnerabilidade sísmica, conforme identificados na literatura científica.	25
Figura 3.1 - Enquadramento do Concelho de Lisboa	28
Figura 3.2 - Esquema da metodologia adotada na construção do modelo de vulnerabilidade sísmica com base no método AHP	30
Figura 3.3 - <i>Modelbuilder</i> do Modelo desenvolvido: Método AHP	31
Figura 3.4 - Estrutura Hierárquica do modelo de vulnerabilidade sísmica de Lisboa	35
Figura 5.1 - Vulnerabilidade Sísmica do Concelho de Lisboa: Cenário 1 (Sismo)	59
Figura 5.2 - Média da Vulnerabilidade Sísmica do Concelho de Lisboa por Freguesia: Cenário 1 (Sismo)	60
Figura 5.3 - Vulnerabilidade Sísmica do Concelho de Lisboa: Cenário 2 (Sismos seguido de Tsunami)	62
Figura 5.4 - Média da Vulnerabilidade Sísmica do Concelho de Lisboa por Freguesia: Cenário 2 (Sismos seguido de Tsunami)	63
Figura 5.5 - Vulnerabilidade Estrutural de Edifícios do Concelho de Lisboa.....	65
Figura 5.6 - Exposição dos Serviços de Saúde à Vulnerabilidade Sísmica do Concelho de Lisboa	67
Figura 5.7 - Potencial de Perda de População do Concelho de Lisboa.....	69
Figura 5.8 - Resultado do WebSIG do Tsunami de 1755 na zona ribeirinha de Lisboa: Impacto do Sismo	71
Figura 5.9 - Resultado do WebSIG do Tsunami de 1755 na zona ribeirinha de Lisboa: Impacto do Tsunami	71

ACRÓNIMOS

AHP - Processo Analítico Hierárquico (*Analytic Hierarchy Process*)

AMC - Análise Multicritério (*Multi-Criteria Analysis*)

BGRI - Base Geográfica de Referenciação de Informação

CDMRRT - *Center for Disaster Management and Risk Reduction Technology*

CI - Índice de Consistência (*Consistency Index*)

CML - Câmara Municipal de Lisboa

CR - Razão de Consistência (*Consistency Ratio*)

DGT - Direção Geral do Território

DR - Detecção Remota

INE - Instituto Nacional de Estatística

InSAR - Interferometria de Radar de Abertura Sintética (*Interferometric Synthetic Aperture Radar*)

IPMA - Instituto Português do Mar e da Atmosfera

LIDAR - Detecção e Alcance por Luz (*Light Detection And Ranging*)

LNEG - Laboratório Nacional de Energia e Geologia

LTVF - Falha de Lisboa e Vale do Tejo

PAF - Falha de Príncipes de Avis

SAR - Radar de Abertura Sintética (*Synthetic Aperture Radar*)

SE - Secção Estatística

SIG - Sistemas de Informação Geográfica

TIG - Tecnologias de Informação Geográfica

USGS - *United States Geological Survey*

1. INTRODUÇÃO

Dada a imprevisibilidade da mãe natureza, os desastres naturais continuam a evidenciar a vulnerabilidade das sociedades contemporâneas. A força destes fenómenos, que frequentemente supera a capacidade de controlo humano, revela os limites da ação humana face ao risco (Martins et al., 2012). Entre os demais, os sismos destacam-se como os mais destrutivos, sendo a segunda maior causa de morte relacionadas com catástrofes na Europa (Corban et al., 2016). Dados do *Our World in Data* revelam um aumento global da atividade sísmica, inclusive em Portugal, traduzido por uma maior frequência, intensidade e abrangência geográfica. No entanto, esta tendência reflete também os avanços tecnológicos no monitoramento e análise, que hoje permitem uma compreensão mais holística dos fenómenos sísmicos (Vargas, 2023). Neste contexto, as Tecnologias de Informação Geográfica (TIG) assumem um papel crucial na gestão e mitigação de riscos, ao viabilizarem análises detalhadas da vulnerabilidade de territórios e populações.

Lisboa surge como um caso de estudo particularmente relevante neste domínio. A cidade, que guarda na memória o devastador terramoto de 1755, enfrenta atualmente uma combinação crítica de fatores: o aumento da atividade sísmica, exacerbado pelo rápido crescimento urbano e pelo aumento da densidade populacional, que elevam significativamente a sua exposição ao risco (Ferreira, 2021). Neste cenário, torna-se vital explorar abordagens de antevisão e resposta a terremotos, onde as TIG, em especial os Sistemas de Informação Geográfica (SIG) e a Detecção Remota (DR), constituem ferramentas centrais no apoio à decisão e no desenvolvimento de soluções.

Neste enquadramento, a presente investigação baseia-se numa revisão de literatura que revela um crescimento do corpo de investigação sobre a temática dos sismos desde 2012. Contudo, persistem lacunas significativas, nomeadamente, a falta de dados detalhados, consistentes e harmonizados entre países, bem como a persistência de metodologias limitadas na avaliação da vulnerabilidade, que comprometem a precisão das análises e a verdadeira compreensão dos riscos sísmicos (Calvi et al., 2006, p. 79; Peduzzi et al., 2005, p. 267; Rashed & Weeks, 2003, p. 548; Xofi et al., 2024, p. 242).

Face a estes desafios, esta dissertação propõe-se a responder à seguinte questão de investigação: De que forma podem as TIG ser eficazmente utilizadas no desenvolvimento de um modelo de vulnerabilidade sísmica que integre dados físicos e humanos na cidade de Lisboa?

Para tal, definiram-se os seguintes objetivos:

- Avaliar o contributo das TIG - com ênfase nos SIG e na DR -, na prevenção e reconstrução sísmica;
- Compreender a vulnerabilidade da cidade de Lisboa;
- Identificar padrões e tendências que possam oferecer perspetivas sobre as características e a distribuição da vulnerabilidade sísmica na cidade;
- Verificar a veracidade de premissas divulgadas nos meios de comunicação social.

A concretização destes objetivos assenta numa abordagem metodológica composta por uma revisão crítica de literatura e no desenvolvimento de uma análise multicritério de riscos, com base em dados abertos oficiais, designadamente do Instituto Nacional de Estatística (INE), da Plataforma Geodados da Câmara Municipal de Lisboa, do Laboratório Nacional de Energia e Geologia (LNEG), da Direção-Geral do Território (DGT), entre outros.

Numa primeira fase, os dados selecionados serão analisados individualmente para identificar padrões de distribuição e, posteriormente, normalizados por meio do cálculo dos respetivos índices de vulnerabilidade. Na fase seguinte, em consonância com abordagens sugeridas na literatura (Armaç, 2012; Bathrellos et al., 2017; Jena et al., 2020; Kolat et al., 2012; Martins et al., 2012; Nyimbili et al., 2018; Rezaie & Panahi, 2015; Skilodimou et al., 2019), utilizar-se-á a técnica Processo Analítico Hierárquico (AHP), permitindo a construção de uma estrutura hierárquica dos fatores que influenciam a vulnerabilidade. Estes incluem variáveis relacionadas com população, edificado, características do solo, acessibilidade aos serviços de emergência e a suscetibilidade a fenómenos secundários, como tsunamis (Xofi et al., 2024).

Espera-se que os resultados obtidos permitam não apenas responder à questão de investigação através da produção de um mapa de vulnerabilidade sísmica geral do concelho e de mapas desagregados por dimensões, mas também pela geração de um segundo cenário de risco composto. Em conjunto, estes produtos deverão facilitar a leitura espacial das zonas mais vulneráveis do concelho e, consequentemente, contribuir para respostas mais rápidas em situações de emergência, bem como para a otimização da alocação de recursos, fortalecendo a resiliência das comunidades afetadas.

Do ponto de vista teórico, este estudo procura aprofundar a integração de componentes físicas e humanos num modelo de vulnerabilidade sísmica suportado por TIG, partindo do princípio de que a vulnerabilidade não se limita ao território físico, mas resulta da interação entre fatores sociais, urbanos e ambientais. Ao fazê-lo, pretende-se colmatar lacunas identificadas na literatura. Em termos prático, propõe-se o desenvolvimento de um modelo geoespacial adaptado à escala local, com potencial para ser ajustado e replicado em contextos semelhantes, apoiando a definição de estratégias de prevenção e reconstrução pós-sismo. Pretende-se, assim, demonstrar a relevância das TIG como instrumentos essenciais para a promoção da resiliência territorial e para a gestão de riscos sísmicos.

Para dar corpo a esta investigação, a dissertação encontra-se organizada da seguinte forma: após esta introdução, segue-se o capítulo de revisão de literatura (2), que apresenta uma síntese do tema, explorando as definições fundamentais, o papel das TIG ao longo do ciclo de gestão do risco sísmico, exemplos de aplicação prática e o enquadramento teórico que sustenta a metodologia adotada. O capítulo seguinte (3) aborda a contextualização do concelho de Lisboa e descreve, de forma pormenorizada, a metodologia utilizada na construção do modelo de vulnerabilidade sísmica, desde a seleção e transformação das variáveis até à estimativa dos respetivos pesos. O capítulo dedicado ao estudo empírico (4) define e operacionaliza as hipóteses de investigação. Em seguida, o capítulo dos resultados e discussão (5) apresenta os mapas de vulnerabilidade gerais e desagregados por dimensões, bem como a validação das hipóteses formuladas. Finalmente, o último capítulo (6) sintetiza as principais conclusões e propõe direções para uma investigação futura.

2. REVISÃO DA LITERATURA

O mundo em que vivemos é constituído por paisagens e sistemas complexos, nos quais ocorrem interações dinâmicas entre diversos fenómenos naturais e antropogénicos. Os riscos naturais, como sismos, representam um exemplo de fenómenos capazes de alterar significativamente a morfologia e os processos funcionais dessas paisagens, gerando impactos adversos em sistemas interdependentes, elevando-se a catástrofes naturais. Dada a natureza multifacetada e multidimensional dos riscos naturais, assim como a tendência crescente da sua ocorrência, magnitude e das consequências estruturais e sociais que acarretam, o seu estudo revela-se crucial para compreender as interações entre sistemas físicos e sociais, bem como para desenvolver estratégias eficazes de mitigação e adaptação. Esta necessidade torna-se particularmente evidente num contexto marcado pelo “crescimento populacional, pela rápida urbanização e pela ocupação massiva de áreas de risco” (Martins et al., 2012, p. 386), fatores que contribuem significativamente para a intensificação dos impactos associados a desastres naturais (Bathrellos et al., 2017, p. 120; Martins et al., 2012, p. 386).

Neste enquadramento, a presente secção (2) visa sustentar teoricamente a problemática em análise, a partir de uma revisão de literatura crítica, a qual permite não apenas identificar e sintetizar os principais contributos científicos sobre a temática da vulnerabilidade sísmica, mas também analisar as abordagens empregues, as metodologias aplicadas, as variáveis consideradas, os principais desafios identificados e as contribuições que sustentam a construção do modelo que será desenvolvido nesta dissertação.

Este procedimento foi desenvolvido em quatro fases principais: pesquisa, seleção, gestão e análise, tal como é possível observar através da Figura 2.1. A fase de pesquisa foi conduzida principalmente através da base de dados *Scopus*, utilizando *queries* como:

TITLE-ABS-KEY (("geographic information systems" OR "gis" OR "remote sensing" OR "geographic information technologies") AND ("earthquake" OR "seismic") AND ("multicriteria analysis" OR "multi-criteria analysis" OR "multicriteria" OR "multi-criteria"))

A aplicação da *query* resultou na identificação de 188 artigos científicos. Para a primeira triagem, os resultados foram ordenados por número de citações, sendo excluídos aqueles que não apresentavam qualquer citação. Estabeleceu-se como critério mínimo de relevância a existência de, pelo menos, uma citação, o que permitiu reduzir o conjunto inicial para 79 artigos.

Na segunda fase, procedeu-se a uma leitura preliminar dos artigos selecionados, com especial atenção às palavras-chave e respectivos resumos. Esta análise possibilitou a construção de uma tabela de revisão de literatura, que serviu de base à seleção final. Este processo contou com o apoio de ferramentas de inteligência artificial generativa, nomeadamente o *Consensus* e o *Scispace*, que facilitaram o preenchimento de determinados campos da tabela e contribuíram para uma seleção mais eficiente. Através desta análise, foram excluídos os artigos cujo conteúdo não se enquadrava nos objetivos do presente estudo, e identificados aqueles com maior potencial de contributo teórico e metodológico, tendo como base critérios como: adequação, relevância e atualidade.

Com uma lista mais restrita, deu-se início à leitura integral dos 7 artigos selecionados. Esta análise crítica permitiu consolidar os principais eixos temáticos, destacar as metodologias mais relevantes e identificar lacunas e contradições na literatura existente. Paralelamente, novos artigos foram integrados a partir de referências cruzadas e de sugestões obtidas através de outras plataformas de inteligência artificial generativa, como o *Litmaps*, o *Scite_* e o *Scopus AI*, que, a partir de um artigo inicial, permitem identificar documentos similares.

Simultaneamente, a gestão das referências foi assegurada através do *software Zotero*, que permitiu organizar, categorizar e referenciar eficientemente os documentos ao longo do desenvolvimento do trabalho.

Por fim, a quarta e última fase, correspondente à análise propriamente dita, constitui o escopo final deste processo. Através das leituras realizadas e da articulação crítica dos conteúdos, foi possível estabelecer pontes entre os diferentes contributos analisados.

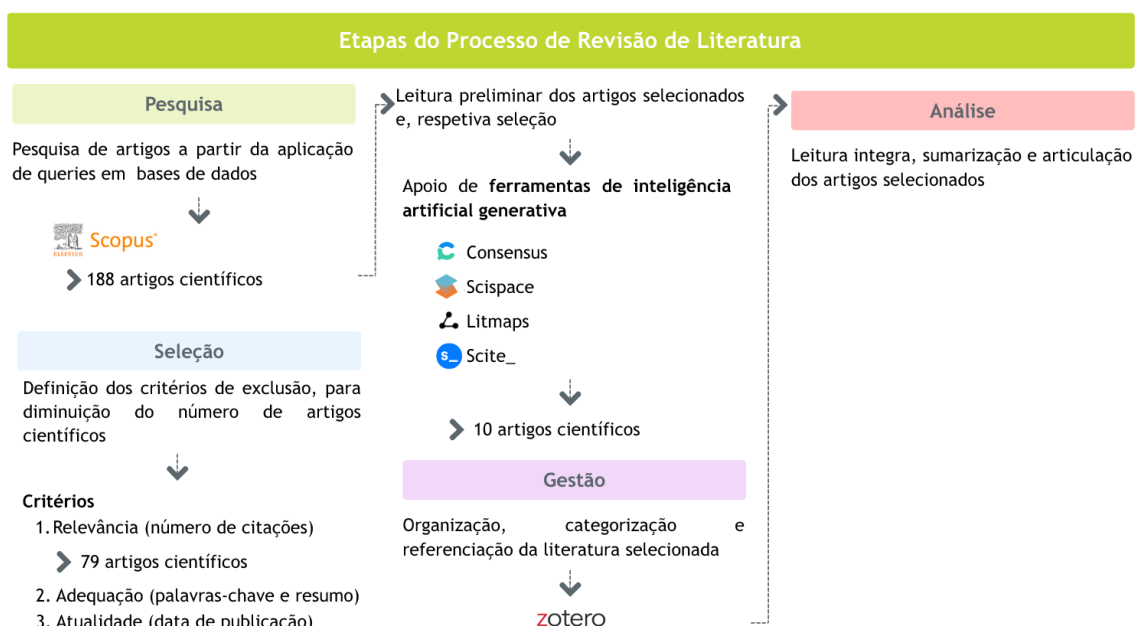


Figura 2.1 - Etapas e ferramentas utilizadas na Revisão de Literatura.

O resultado deste processo encontra-se estruturado nesta secção, que se inicia com a apresentação das definições e características fundamentais dos sismos (2.1). Seguidamente, é abordado o contributo das Tecnologias de Informação Geográfica na avaliação da vulnerabilidade sísmica (2.2), bem como as metodologias associadas à sua aplicação (2.3). Por fim, procede-se à identificação dos principais critérios, subcritérios e variáveis considerados nesta temática (2.4).

2.1. Definição e Características dos Sismos

A literatura científica oferece diversas interpretações sobre conceitos fundamentais relacionados com a sismicidade — nomeadamente perigo, desastre natural, risco, exposição, vulnerabilidade e suscetibilidade —, as quais variam em função da abordagem teórica, do enquadramento disciplinar ou da metodologia adotada. Esta diversidade terminológica reflete a complexidade e o carácter multidimensional dos fenómenos sísmicos, que podem ser analisados sob diferentes prismas, como o geofísico, geotécnico, entre outros.

Face a esta situação, esta secção dedica-se a reunir e analisar as principais definições presentes na literatura, com o intuito de clarificar os elementos centrais que estruturam o conceito de sismo. A definição adotada para o presente estudo é

igualmente explicitada, assegurando a coerência conceptual da investigação e sustentando as decisões metodológicas que a orientam.

2.1.1. Perigo e Desastre Natural

Apesar da semelhança terminológica entre os conceitos de perigo natural (*natural hazard*) e *desastre natural* (*natural disasters*), a literatura distingue-os concetualmente. Os perigos naturais podem ser definidos como eventos com potencial para causar danos sobre os ambientes natural e construído, sem que impliquem, necessariamente, a ocorrência de prejuízos humanos ou materiais (Bathrellos et al., 2017, p. 120). Contudo, quando estes fenómenos “ultrapassam as idiosincrasias do ambiente físico” (Martins et al., 2012, p. 386) e resultam em perdas de população e infraestruturas, passam a ser considerados desastres naturais (Bathrellos et al., 2017, p. 120).

A gravidade dos impactos varia consoante múltiplos fatores, como as características geográficas dos locais, “a magnitude do fenómeno, a vulnerabilidade da população, as características do edificado e a capacidade dos sistemas políticos” (Armaş, 2012, p. 1130). Quando estes elementos interagem desfavoravelmente, o fenómeno perigoso transforma-se num desastre natural, interferindo diretamente na vida das populações e comprometendo o normal funcionamento das atividades sociais. Por outras palavras, o perigo diz respeito ao potencial de um fenómeno natural causar estragos, sendo apenas quando esse fenómeno afeta populações ou infraestruturas que se configura como um desastre natural.

Num contexto marcado por uma procura constante de crescimento populacional, pela rápida urbanização e pela ocupação massiva de áreas de risco, a intervenção humana no território assume um papel central na amplificação dos efeitos dos perigos naturais (Bathrellos et al., 2017, p. 120). Quando não são respeitados os limites e a dinâmica dos sistemas naturais, as sociedades tornam-se mais expostas e vulneráveis. Como referem Armaş (2012, p. 1130), Bathrellos et al. (2017, p. 120) e Martins et al. (2012, p. 386), os desastres naturais não são apenas o resultado de fenómenos físicos extremos, mas decorrem da interação entre estes fenómenos e sistemas sociais frágeis. Por isso, como sintetizam Martins et al. (2012), os desastres

naturais representam o ponto de encontro entre os perigos naturais e a vulnerabilidade das populações humanas.

2.1.1.1 Sismos

Os sismos constituem um exemplo de perigos naturais, sendo definidos como fenómenos que resultam do movimento das placas tectónicas, libertando grandes quantidades de energia que se propagam através da crosta terrestre sob a forma de ondas sísmicas (Serviço Regional de Proteção Civil e Bombeiros dos Açores, 2020). Estes eventos podem gerar consequências catastróficas, não apenas pela força destrutiva dos abalos, mas também pelo conjunto de perigos e impactos que desencadeiam a curto e a longo prazo, podendo, em casos extremos, comprometer a interação entre os ecossistemas e os seres humanos (Rashed & Weeks, 2003, p. 552; Skilodimou et al., 2019, p. 2). Nessa condição, deixam de ser apenas perigos naturais e passam a configurar-se como desastres.

2.1.2. Risco, Perigo, Exposição, Vulnerabilidade

O risco, no contexto da análise de desastres naturais, pode ser entendido como a estimativa das perdas esperadas associadas à ocorrência de um perigo natural. Segundo Peduzzi et al. (2005, p. 266), este conceito resulta da combinação de três fatores fundamentais: o perigo, a exposição e a vulnerabilidade, sendo calculado com base na seguinte fórmula (1):

$$\textit{Risco} = \textit{Perigo} \times \textit{Exposição} \times \textit{Vulnerabilidade} \quad (1)$$

O conceito de perigo, conforme já abordado na subsecção anterior (2.1.1), não será aqui aprofundado. No entanto, importa referir que, para efeitos do cálculo do risco, se considera a “probabilidade de ocorrência de um perigo” (Peduzzi et al., 2005, p. 266), com base nas suas características específicas. No caso de um sismo: a sua intensidade e frequência.

A exposição refere-se à presença de pessoas, edifícios, infraestruturas, atividades económicas ou património ambiental em áreas de risco, suscetíveis à atividade de fenómenos de carácter perigoso. Por outras palavras, representa todo

o conjunto de elementos que podem estar em risco, independentemente da sua vulnerabilidade.

A vulnerabilidade, por sua vez, diz respeito à suscetibilidade de uma sociedade face um determinado evento. De acordo com Martins et al. (2012, p. 386), este termo reflete a capacidade de uma comunidade para se preparar, resistir, responder e recuperar de um desastre, considerando não apenas a fragilidade individual, mas também outras componentes como o ambiente construído e as características socioespaciais dos territórios. Trata-se, portanto, de uma abordagem holística capaz de compreender fatores demográficos, socioeconómicos, físicos, entre outros.

Por outro lado, outros autores propõem perspectivas distintas. Rashed & Weeks (2003, p. 547) conceptualizam a vulnerabilidade como uma função entre a elementos sociais e demográficos com elementos de carácter físico, com o objetivo de identificar as áreas mais frágeis e orientar intervenções preventivas. Calvi et al. (2006, p. 76), apresentam uma visão mais técnica, na medida em que consideram este conceito como a suscetibilidade física de um local a sofrer danos perante a ocorrência de um evento sísmico. Já Armaş (2012, p. 1130), interpreta a vulnerabilidade como uma medida do “potencial de perda” que permite compreender de que forma um perigo se transforma num desastre natural.

Para Peduzzi et al. (2005, p. 266), a vulnerabilidade corresponde à posição relativa de cada componente do modelo face à perda esperada, tendo em conta a gravidade de um fenómeno. O resultado deste conjunto permite comparar as diferenças entre regiões com diferentes níveis de desenvolvimento e capacidade de resposta.

Embora todas estas definições partilhem uma base comum - a ideia de fragilidade perante um fenómeno -, é possível identificar variações nas suas aplicações. Neste sentido, esta dissertação seguirá a perspectiva de Martins et al. (2012, p. 386), uma abordagem multidimensional, tendo em consideração múltiplos fatores. No entanto, enquanto os autores se focam especificamente na vulnerabilidade social, o presente estudo ampliará este entendimento, integrando também outras componentes que se considerem relevantes de outros artigos para a análise da vulnerabilidade sísmica.

2.1.2.1 Vulnerabilidade e Suscetibilidade

Os conceitos de vulnerabilidade e suscetibilidade são frequentemente utilizados como sinónimos, contudo, uma apresenta pequena conotação que importa mencionar. Esta distinção assume particular relevância no enquadramento teórico adotado e permite, igualmente, justificar algumas das opções metodológicas tomadas ao longo do presente trabalho.

Como é possível observar na secção anterior (2.1.2), é comum que diversos autores recorram ao termo suscetibilidade nas suas definições de vulnerabilidade, sobretudo para descrever a propensão a estragos. Na prática, a suscetibilidade pode ser entendida como uma componente da vulnerabilidade, estando relacionada com a tendência inerente de um elemento - físico, social ou ambiental - de sofrer consequências adversas face à ocorrência de um perigo, como os sismos (Fischer et al., 2016, p. 46).

Deste modo, a vulnerabilidade, enquanto conceito mais amplo que engloba um conjunto de suscetibilidades específicas que, em articulação com outras variáveis, determinam o grau de impacto que uma população e/ou território poderá sofrer quando exposto a um evento deste tipo.

2.1.3. Cadeia de Riscos Sísmicos - Conexão entre Conceitos

Para uma compreensão integrada dos conceitos anteriormente abordados, esta secção explora a cadeia de riscos sísmicos. Esta permite visualizar de forma sequencial como um sismo desencadeia uma série de perigos, danos e perdas, evidenciando a interligação entre os diferentes elementos que contribuem para o impacto total de um evento sísmico.

Portanto, tal como é possível observar a partir da Figura 2.2, imediatamente após a ocorrência de um sismo, manifestam-se os perigos primários diretamente associados ao evento sísmico. Estes incluem a fracturação do solo, os abalos, a liquefação do terreno, os deslizamentos de terras e, em áreas costeiras, a possibilidade de formação de tsunamis. De salientar que estes a ocorrência destes fenómenos depende das características específicas dos territórios atingidos pelo evento inicial, o sismo.

Estes perigos iniciais podem ser extremamente destrutivos, provocando estragos imediatos nas infraestruturas e na perda de vidas humanas. No entanto, os impactos de um sismo não se limitam aos efeitos imediatos. À medida que os danos primários se tornam evidentes, os prejuízos secundários agravam frequentemente a situação, tais como incêndios, libertação de materiais perigosos, inundações, entre outros. Assim, os sismos não são eventos isolados que afetam exclusivamente as infraestruturas físicas. Desencadeiam um ciclo de destruição e perda que impacta múltiplas esferas – física, económica, social e ambiental – cujos efeitos podem ter impactos duradouros, dificultando a recuperação total das comunidades e regiões afetadas (Rashed & Weeks, 2003, p. 552; SSC, 1999, pp. 11-12).

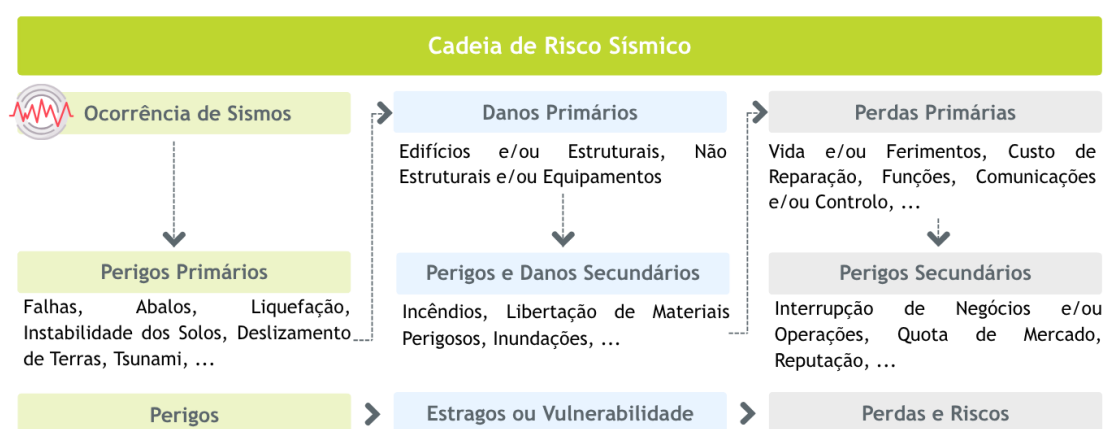


Figura 2.2 - Cadeia de Risco Sísmico. *Seismic Safety Commission* (1999), citado por Rashed & Weeks (2003)

2.2. Tecnologias de Informação Geográfica na Gestão de Desastres Naturais

Os mapas, mesmo em contextos considerados “normais”, desempenham um papel fundamental no planeamento e desenvolvimento territorial. Permitem que os especialistas analisem e interpretem o território, identificando áreas com potencial de replicação de boas práticas, bem como zonas críticas que exigem intervenção. Através da análise e interpretação espacial, é possível reconhecer padrões que podem representar conflitos, riscos ou oportunidades, facilitando a definição de estratégias adequadas para minimizar impactos negativos ou potenciar soluções benéficas.

Num contexto como o de gestão de desastres naturais, a importância dos mapas torna-se ainda mais evidente. Estes instrumentos possibilitam a análise dos padrões espaciais associados aos fenómenos naturais e às suas consequências – de natureza física, estrutural ou ambiental (Bathrellos et al., 2017, p. 120). Os mapas tornam-se, assim, ferramentas centrais em todas as fases da gestão de desastres: desde a previsão e alerta antecipado, à monitorização em tempo real, passando pela gestão de recursos e resposta rápida, até às fases de reabilitação e reconstrução.

Contudo, o efeito destes mapas depende diretamente das tecnologias que os suportam. As TIG, nomeadamente os SIG e a DR, são fundamentais para a produção, atualização e análise dos dados geoespaciais que alimentam estes mapas, tornando possível uma gestão de desastres mais informada, eficiente e eficaz.

2.2.1. Sistemas de Informação Geográfica (SIG)

Os SIG são tecnologias relativamente recentes, cuja consolidação acompanha a transição da sociedade para uma era marcada pela valorização da tecnologia, da automação e da análise espacial. Este novo paradigma promoveu o questionamento sobre os problemas de natureza geográfica e abriu caminho para que os SIG fossem progressivamente reconhecidos como ferramentas fundamentais na resolução desses desafios (Rashed & Weeks, 2003, p. 548). Embora os primeiros desenvolvimentos nesta área remontem à década de 1960, foi apenas a partir dos anos 1990 que, segundo Armaş (2012, p. 1131), os SIG passaram a ser consecutivamente considerados como TIG com elevado potencial para a aplicação de metodologias capazes de apoiar uma tomada de decisão mais consciente.

Estes avanços permitiram que os SIG se destacassem atualmente como ferramentas cruciais no estudo e gestão de desastres naturais, dada a sua capacidade de analisar fenómenos geográficos de forma integrada. Esta capacidade de avaliação possibilita a antecipação de cenários e a definição de respostas mais adequadas para os territórios afetados. Com base na análise espacial de múltiplos fatores, os SIG integram dados geográficos com algoritmos, que permitem gerar estimativas de vulnerabilidade, desenvolver modelos e analisar diferentes camadas de dados.

Através da produção de mapas temáticos e da sobreposição de variáveis, estas tecnologias facilitam a compreensão das dinâmicas espaciais e temporais associadas a fenómenos como os terremotos, oferecendo um suporte à tomada de decisões informadas (Bathrellos et al., 2017, p. 120). Além disso, o facto de os softwares SIG permitirem lidar com diversos problemas em simultâneo e adotarem diferentes métodos de análise constitui uma das suas principais vantagens operacionais (Xu et al., 2016, p. 52).

2.2.1.1. Aplicação dos SIG na Gestão de Desastres Naturais

De forma a demonstrar o potencial dos SIG para "gerir, controlar, processar e analisar dados espaciais" (Rezaie & Panahi, 2015, p. 462), apresentam-se, a seguir, de forma sucinta, alguns exemplos que ilustram a sua aplicação prática nas diferentes fases da gestão de desastres naturais.

Martins et al. (2012) realizaram um estudo com o objetivo de prever e identificar os bairros socialmente mais vulneráveis no município de Vila Franca do Campo, na Ilha de São Miguel, Açores, perante a eventualidade de um evento sísmico. Para tal, integraram diversas camadas de dados relacionadas com fatores de decisão, como variáveis demográficas, socioeconómicas, estruturais e de exposição, desdobradas em outros dois níveis de análise, num ambiente SIG. Esta abordagem permitiu a construção de um modelo de vulnerabilidade capaz de apoiar a definição de medidas e a implementação de políticas que minimizem os riscos associados à ocorrência de um sismo, funcionando igualmente como um instrumento de apoio à gestão de emergências.

No que respeita à monitorização em tempo real, destacam-se plataformas como o "Latest Earthquakes" da *United States Geological Survey* (USGS) (<https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/map/>) e o "Mapa Dinâmico - Atividade Sísmica" do Instituto Português do Mar e da Atmosfera (IPMA) (<https://www.ipma.pt/pt/geofisica/sismicidade/>). Estas plataformas permitem o acompanhamento contínuo da atividade sísmica, tanto a nível nacional como global, disponibilizando informações detalhadas sobre eventos sísmicos, como o epicentro, a hora de ocorrência e a magnitude. Os dados são acessíveis ao público através de

interfaces SIG interativas, facilitando a visualização geoespacial e a rápida interpretação da informação por diferentes utilizadores.

Numa perspetiva de resposta rápida, o artigo de (Qu et al., 2023) demonstram a capacidade dos SIG para integrar informação geoespacial na gestão de recursos logo após o duplo terramoto de 6 de fevereiro de 2023 na Turquia. O estudo descreve como, num curto espaço de tempo, foi possível elaborar e disponibilizar um mapa dos hospitais operacionais nas províncias mais afetadas. A cartografia baseou-se em dados recolhidos por equipas de engenheiros especializadas no terreno e permitiu informar, não apenas as autoridades, mas também a população, indicando os locais para onde se deveriam dirigir em caso de necessidade de cuidados médicos, contribuindo assim para uma resposta mais coordenada e eficaz.

Por último, um exemplo relevante na fase de reparação e reconstrução sísmica é a base de dados de código aberto disponibilizada online após o sismo no Haiti em 2010, através da plataforma *Ushahidi*. Esta aplicação, assente em tecnologias SIG, permitiu que voluntários registassem ocorrências em tempo real, como danos estruturais, necessidades urgentes e outras situações críticas, fornecendo informações cruciais tanto para a população como para as equipas de emergência envolvidas nas operações de ajuda humanitária. Para além da resposta imediata, a ferramenta contribuiu significativamente para a avaliação do estado do território e serviu como referência essencial no planeamento da sua recuperação pós-catástrofe (Heinzelman & Waters, 2010, pp. 6-9).

2.2.1.2. Limitações dos SIG

Apesar das vantagens reconhecidas dos SIG, em particular no apoio à tomada de decisão através da integração de variáveis com forte componente espacial, esta tecnologia continua a apresentar limitações relevantes, especialmente no contexto da avaliação da vulnerabilidade. De acordo com Contreras et al. (2020, p. 1664) e Rashed & Weeks (2003, p. 548), subsistem críticas tanto ao nível teórico como tecnológico que dificultam a definição e operacionalização do conceito de vulnerabilidade, comprometendo a sua plena integração em estratégias eficazes de mitigação.

Do ponto de vista mais técnico, vários autores identificam constrangimentos adicionais. Entre eles destacam-se: a dificuldade em integrar eficazmente dados socioeconómicos, fundamentais para uma avaliação abrangente da vulnerabilidade; a escassez ou o acesso restrito a grandes volumes de dados apropriados, essenciais para análises consistentes; a reduzida flexibilidade das ferramentas SIG face às necessidades específicas dos utilizadores; e a persistência de metodologias pouco desenvolvidas, frequentemente baseadas numa compreensão ainda limitada dos fenómenos complexos associados à vulnerabilidade (Calvi et al., 2006, p. 79; Peduzzi et al., 2005, p. 267; Rashed & Weeks, 2003, p. 548; Xofi et al., 2024, p. 242).

Estas limitações não desvalorizam o contributo dos SIG, mas evidenciam a necessidade de atenção redobrada no desenvolvimento de modelos de avaliação da vulnerabilidade, onde as decisões se baseiam fortemente na qualidade dos dados e na estrutura metodológica adotada.

2.2.2. Detecção Remota (DR)

Embora o foco principal desta dissertação incida sobre os SIG, importa reconhecer que a DR, enquanto componente complementar das TIG, também desempenha um papel significativo na gestão de desastres naturais. Assim, justifica-se a apresentação do seu contributo neste contexto.

Tal como ocorreu com os SIG, o desenvolvimento e reconhecimento da Detecção Remota como ferramenta de apoio à gestão de riscos tem vindo a consolidar-se sobretudo nas últimas duas décadas, destacando-se pelo seu potencial nas fases de prevenção e reconstrução de desastres naturais. A sua utilidade tem sido particularmente valorizada na análise da vulnerabilidade sísmica, pela capacidade de obter, através da observação por satélite, informações detalhadas sobre o estado do território (Tralli et al., 2005, p. 186).

Neste contexto destacam-se três principais tecnologias de observação remota: imagens óticas de alta resolução, radar de abertura sintética (SAR) e tecnologia de deteção e alcance por luz (LIDAR). Segundo Tralli et al. (2005), estas tecnologias revolucionaram o campo da gestão de desastres, ao permitirem “gerar cenários,

elaborar planos de mitigação e implementar medidas de resposta eficazes” (Tralli et al., 2005, p. 186) num espaço de tempo reduzido – em dias, horas ou até minutos.

Embora existam pontos de convergência com os SIG, os autores destacam que a Detecção Remota por satélite tem vindo a constituir uma base cada vez mais robusta de apoio à tomada de decisão em contextos de risco.

2.2.2.1. Aplicação da DR na Gestão de Desastres Naturais

Para demonstrar o potencial da DR na Gestão de Desastres Naturais, nos próximos parágrafos serão evidenciados alguns exemplos de como esta componente tecnológica tem vindo a ser eficaz para três diferentes etapas do processo: previsão e alerta antecipado, gestão de recursos e resposta rápida e recuperação e reconstrução.

A avaliação de risco sísmico realizada por Nolte (2010) em parceria com o *Center for Disaster Management and Risk Reduction Technology* (CDMRRT) para Java, na Indonésia, uma região altamente afetada por este tipo de fenómeno é um exemplo dos benefícios da DR na previsão e alerta antecipado. Neste processo, diversos conjuntos de dados geoespaciais foram sobrepostos e analisados para criar um mapa de risco sísmico, focado nos possíveis danos em edifícios. A análise considerou vários fatores, utilizando imagens de satélite capturadas antes e depois de eventos sísmicos. Após a aplicação dos métodos de processamento e de classificação de imagem, o resultado é uma representação cartográfica que fornece informações sobre as zonas mais vulneráveis a terremotos, ou seja, áreas prioritárias para a implementação de medidas de prevenção e resposta.

A gestão de recursos e resposta rápida está diretamente relacionada com a monitorização em tempo “quase real”. De forma a confirmar a veracidade deste conceito, o artigo dos autores Li et al. (2021, pp. 14-15) aborda essa questão. De acordo com os autores, o Sentinel-1, que está equipado com tecnologia InSAR (*Interferometric Synthetic Aperture Radar*), desempenha um papel fundamental nesse processo.

Segundo este artigo, o sistema verifica automaticamente os sismos mais recentes a partir do site da USGS e avalia se são adequados para observações InSAR. As

informações sísmicas que atendem aos critérios são salvas na lista de tarefas de processamento. Com base nessas informações, o sistema pode consultar os dados e baixar imagens SAR SLC (*Single Look Complex*) eficazes. O programa de acesso aos dados entra em modo de espera por 60 minutos até que as imagens SAR pós-evento estejam prontas. Assim que os dados SAR mais recentes após o terremoto estão disponíveis, o tempo de *download* dos dados é de aproximadamente 10 minutos, o processamento dos dados leva menos de 10 minutos, e a preparação para exibição dos dados demora 5 minutos. Portanto, são necessários cerca de 25 minutos desde a transferência dos dados até a exibição das informações. Este curto tempo de obtenção de dados facilita a localização estratégica de hospitais de campanha, pontos de encontro e rotas de evacuação, proporcionando uma convergência eficiente de recursos.

O terceiro e último exemplo, embora possa parecer repetido, apresenta uma abordagem distinta, desta vez centrada na aplicação da Detecção Remota no contexto da recuperação e reconstrução após o sismo no Haiti. Paralelamente às ações desenvolvidas numa plataforma de tecnologia SIG, segundo os autores Boccardo & Tonolo (2012, p. 529), o acionamento antecipado de satélites de observação da Terra, aliado à sua integração com imagens aéreas, imagens de radar SAR de alta resolução, dados térmicos e LIDAR, revelou-se crucial. Esta combinação permitiu a aquisição de informação mais precisa e em tempo reduzido, um fator determinante para as equipas de socorro, ao possibilitar uma visão geral dos danos reais no território, a identificação das rotas de acesso e a rápida produção de mapas, como os incluídos no Harvard Dataverse, disponíveis alguns, em apenas algumas horas após o evento (Berman, 2015).

Segundo Boccardo & Tonolo (2012, p. 532), no que diz respeito à validação, os valores de precisão variaram entre 60% e 70%. Ou seja, apesar de a tecnologia SIG, descrita com maior detalhe na secção 2.2.1.1., constituir uma ferramenta eficaz, está ainda sujeita a erros, nomeadamente na georreferenciação de ocorrências inseridas por cidadãos, o que depende do seu nível de civismo e rigor. Por contraste, a Detecção Remota, ao fornecer uma representação direta do território, tende a transmitir uma realidade mais objetiva e valorizada.

No entanto, como referido pelos autores, os restantes 30% a 40% de imprecisão estão relacionados com a dificuldade em identificar o grau de destruição dos edifícios através das imagens. É precisamente neste ponto que se evidencia o valor de abordagens integradas, que combinam SIG e Deteção Remota, tornando a análise geoespacial mais completa, especialmente no âmbito da avaliação e resposta a desastres naturais como os sismos. Para além da resposta imediata, esta integração de tecnologias representa também um contributo fundamental para o reordenamento do território e para o planeamento de uma reconstrução mais resiliente.

2.2.2.2. Limitações da DR

A Deteção Remota tem vindo a consolidar-se como uma ferramenta estratégica para a comunidade científica, nomeadamente em estudos de engenharia sísmica, ao permitir a monitorização e avaliação dos impactos provocados por eventos sísmicos. Contudo, a sua aplicação prática ainda enfrenta limitações técnicas e operacionais significativas. Um dos principais obstáculos relaciona-se com a aquisição de imagens de satélite, frequentemente condicionada por fatores como o posicionamento orbital do sensor no momento do sismo ou a interferência de cobertura nublada. Estas condicionantes podem comprometer a qualidade das imagens, dificultar o processo de georreferenciação e limitar a integração eficiente com outras fontes de dados espaciais (Peduzzi et al., 2005, p. 267; Rathje & Adams, 2008, p. 483).

Paralelamente segundo os autores Boccardo & Tonolo (2012, p. 532) e Rathje & Adams (2008, pp. 483-484), o acesso a imagens de elevada resolução espacial continua a ser um processo dispendioso e, por vezes, demorado, implicando também a gestão de grandes volumes de dados que requerem infraestruturas robustas de armazenamento, processamento e análise. Acresce ainda a carência de formação técnica por parte de muitos profissionais que operam no terreno, o que compromete a correta manipulação e interpretação dos dados. Sem ferramentas adequadas ou competências específicas, a utilidade das imagens pode ser severamente reduzida. Neste sentido, torna-se fundamental investir na capacitação dos utilizadores e na criação de interfaces mais intuitivas que facilitem a leitura e interpretação dos produtos gerados.

Do ponto de vista técnico, a atual geração de sensores apresenta limitações na detecção de danos estruturais de menor gravidade, mostrando maior eficácia na identificação de colapsos significativos. A introdução de sensores com muito alta resolução poderá atenuar este problema, mas é importante reconhecer que a DR não substitui a necessidade de missões presenciais de reconhecimento pós-sismo. Por outro lado, a padronização das escalas de classificação de danos utilizadas nos produtos derivados da DR é essencial para garantir consistência, comparabilidade e fiabilidade nas estimativas obtidas (Boccardo & Tonolo, 2012, p. 532; Peduzzi et al., 2005, p. 267; Rathje & Adams, 2008, p. 483).

Em síntese, apesar dos progressos registados, a utilização da DR em contexto sísmico continua a deparar-se com diversos desafios. Ainda assim, tendo em conta o rápido avanço das tecnologias de observação da Terra e o contínuo desenvolvimento digital, é expectável que grande parte destas limitações seja gradualmente superada no futuro (Rathje & Adams, 2008, pp. 482-484).

2.3. Análise Multicritério na Avaliação de Risco Sísmico

Existem diversas metodologias destinadas a abordar questões direta ou indiretamente relacionadas com o Planeamento e Ordenamento do Território, como é o caso da Avaliação do Risco Sísmico. Muitas destas abordagens são complementares entre si, permitindo a realização de análises mais integradas, coerentes e alinhadas com os objetivos específicos de cada investigação.

No contexto deste estudo, durante a pesquisa, seleção e leitura de documentos relevantes, a Análise Multicritério (AMC) revelou-se o método preferido por diversos autores - (Armaş, 2012; Bathrellos et al., 2017; Jena et al., 2020; Kolat et al., 2012; Martins et al., 2012; Nyimbili et al., 2018; Rashed & Weeks, 2003; Rezaie & Panahi, 2015; Skilodimou et al., 2019; Walker et al., 2014). Trata-se de um método composto por um conjunto de técnicas destinadas a considerar múltiplos fatores na tomada de decisões, tal como o próprio nome indica, uma característica particularmente valorizada em cenários onde as decisões não dependem de uma única variável, mas de múltiplas condições que podem influenciar os resultados de maneira significativa.

O processo da AMC pode ser estruturado em quatro etapas fundamentais. A primeira etapa consiste na definição dos objetivos e fatores de vulnerabilidade, ou seja, na identificação das condições e variáveis que irão compor o modelo de avaliação. Após esta definição, procede-se à normalização dos fatores numa escala comum, o que permite compará-los entre si de forma consistente numa fase posterior. Esta padronização é essencial para garantir a coerência das análises, especialmente quando os critérios possuem unidades ou magnitudes diferentes. A terceira fase corresponde à atribuição de pesos a cada critério, com base na sua importância relativa. Esta fase pode envolver a participação de diferentes *stakeholders*, permitindo que os julgamentos sobre a relevância de cada critério sejam discutidos e hierarquizados conforme os objetivos da análise. Por fim, a quarta fase, designada pelos autores Martins et al. (2012) como “regra de decisão”, consiste na agregação dos critérios previamente definidos e ponderados (Martins et al., 2012, pp. 390-391).

Quando aplicada aos SIG, a AMC permite a transformação dos dados geográficos (dados de entrada) num modelo espacial de vulnerabilidade (mapa final). Os resultados obtidos através da aplicação desta metodologia vão além de uma mera representação da distribuição geográfica dos fatores analisados, integrando também o julgamento qualitativo dos atores envolvidos no processo (Nyimbili et al., 2018, p. 1525). Esta incorporação da experiência dos decisores enriquece a avaliação, assegurando que as decisões sejam fundamentadas numa compreensão holística das complexidades e nuances do sistema em análise. No entanto, importa reconhecer que este processo também pode acarretar níveis de incerteza e subjetividade (Martins et al., 2012, pp. 390-391; Nyimbili et al., 2018, p. 1525).

De entre os demais métodos da AMC, foi optado pelo Processo Analítico Hierárquico (AHP), cuja descrição detalhada será apresentada na subsecção seguinte (2.3.1).

2.3.1. Processo Analítico Hierárquico

Dentro da AMC, diversos métodos heurísticos, estatísticos e determinísticos têm sido utilizados na modelação e estimativa de riscos. Entre estes, destaca-se o Processo Analítico Hierárquico (AHP), adotado pela sua capacidade de integrar

variáveis quantitativas e qualitativas no processo de avaliação. Esta característica permite a simulação de cenários baseados nos pesos atribuídos a diferentes critérios, conferindo maior precisão às estimativas e tornando o AHP especialmente útil em contextos de análise de riscos naturais e geológicos (Bathrellos et al., 2017, p. 120; Skilodimou et al., 2019, p. 2).

Desenvolvido por Thomas Saaty na década de 70, o AHP ganhou notoriedade prática a partir dos anos 90, impulsionado pela evolução das TIG e pela crescente valorização da análise espacial. A sua estrutura metodológica, que permite organizar e hierarquizar múltiplos critérios de forma sistemática, tornou-o particularmente relevante para suportar decisões complexas, incluindo aquelas relacionadas com a gestão de riscos naturais (Armaş, 2012, p. 1131).

A aplicação do AHP baseia-se na comparação par a par dos critérios selecionados, atribuindo-se pesos relativos a cada variável com base na sua importância hierárquica. Cada comparação é quantificada numa escala de níveis de importância, numerados de 1 a 9, sendo: o valor 1 atribuído a critérios com igual importância até ao valor 9 atribuído quando um critério é considerado extremamente importante face a outro, tal como é possível observar na Tabela 2.1.

Estas comparações são organizadas em matrizes, onde os valores atribuídos são convertidos, normalizados e utilizados para calcular os pesos finais. Este processo facilita uma análise estruturada e eficaz, exigindo apenas que o utilizador compreenda as relações de importância entre os critérios em análise (Nyimbili et al., 2018, p. 1528; Skilodimou et al., 2019, p. 3).

Tabela 2.1 - Escala fundamental de Saaty. Adaptado de (Rezaie & Panahi, 2015, p. 466; Saaty & Vargas, 2012, p. 6)

Grau de Importância	Definição	Explicação
1	Importância igual	As duas atividades contribuem igualmente para o objetivo
3	Importância moderada	A experiência e o julgamento favorecem ligeiramente uma atividade em detrimento de outra.
5	Grande importância	A experiência e o bom senso favorecem fortemente uma atividade em detrimento de outra.
7	Importância muito forte ou comprovada	Uma atividade é fortemente preferida em relação a outra; a sua predominância é demonstrada na prática.
9	Importância extrema	As evidências que favorecem uma atividade em detrimento de outra são da mais alta ordem possível de afirmação.
2, 4, 6, 8	Importância intermédia	Usado para representar compromissos entre as preferências nos pesos 1, 3, 5, 7 e 9

Após a atribuição de pesos entre os critérios, torna-se necessário avaliar a coerência das comparações realizadas. Para este fim, Saaty desenvolveu um sistema de verificação baseado no cálculo de dois índices.

Para garantir a “consistência entre os julgamentos e os pesos” (Rezaie & Panahi, 2015, p. 466), é calculado o Índice de Consistência (CI), que avalia o grau de coerência interna da matriz de comparações par-a-par, conforme apresentado na fórmula (2):

$$CI = \frac{\lambda_{max} - N}{N - 1} \quad (2)$$

onde λ_{max} corresponde ao maior valor próprio da matriz, calculado através da multiplicação da matriz original pelo vetor de pesos e da posterior divisão de cada resultado pelo peso correspondente. O valor final resulta da média desses quocientes. Já N representa o número de critérios considerados.

Com o intuito de avaliar a consistência global da matriz, calcula-se a Razão de Consistência (CR), expressa na fórmula (3)

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (3)$$

onde CI é o índice de consistência anteriormente calculado e RI corresponde ao Índice de Consistência Aleatória Média, tabelado de acordo com o número de critérios N , conforme apresentado na Tabela 2.2.

Tabela 2.2 - Índice de Consistência Aleatória Média de Saaty, citado por (Rezaie & Panahi, 2015)

N	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
RI	0.00	0.00	0.58	0.90	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45	1.49	1.52	1.54

De acordo com a literatura, considera-se consistente um valor de CR inferior a 0,1; valores superiores indicam incoerência nas comparações e exigem uma nova ponderação (Martins et al., 2012, pp. 393-395; Rezaie & Panahi, 2015, p. 466; Saaty & Vargas, 2012, pp. 5-6).

Assim, os valores de CI e CR assumem um papel fundamental na validação dos pesos atribuídos no AHP, garantindo que o modelo final assente em comparações metodologicamente fiáveis.

Contudo, apesar da sua versatilidade, o AHP apresenta limitações. Uma das mais significativas é a sua dificuldade em lidar com a incerteza e a variabilidade dos dados, um aspeto crítico em contextos de risco (Bathrellos et al., 2017, p. 120). Esta limitação evidencia a necessidade de adaptar os métodos às particularidades do contexto estudado, dado que não existe uma abordagem universal aplicável a todos os casos. A literatura sublinha que cada território possui características únicas, tanto comuns quanto específicas, que influenciam diretamente a sua vulnerabilidade. Assim, a escolha metodológica deve ser cuidadosamente ponderada, assegurando que os modelos de análise de risco sejam representativos das dinâmicas e realidades locais (Armaş, 2012, p. 1131; Rashed & Weeks, 2003, p. 550).

Apesar dessas limitações, o AHP tem-se destacado na análise espacial aplicada à gestão de riscos. Através da sua integração em ambiente SIG, é possível gerar mapas de vulnerabilidade que fornecem informações estratégicas aos decisores. Estes produtos cartográficos permitem visualizar, de forma integrada e hierarquizada, os fatores de risco, apoiando a tomada de decisão com base em dados objetivos e estruturados (Armaş, 2012, p. 1131).

2.4. Variáveis-Chave na Avaliação da Vulnerabilidade Sísmica

Com base na análise da literatura científica, procedeu-se à sistematização dos principais critérios, subcritérios e variáveis utilizados na avaliação da

vulnerabilidade sísmica. A Figura 2.3 apresenta um quadro-resumo dessas dimensões, conforme identificadas em diversos estudos de referência, permitindo compreender as diferentes perspectivas adotadas pelos autores na operacionalização dos fatores que contribuem para a vulnerabilidade.

Esta síntese não representa, necessariamente, o conjunto de variáveis que será utilizado no modelo desenvolvido na presente dissertação, mas constitui antes uma base de referência que fundamenta a seleção dos critérios a integrar na estrutura hierárquica do modelo AHP. A escolha das variáveis específicas será posteriormente adaptada à realidade do caso de estudo e à disponibilidade de dados.

Critérios, Subcritérios e Variáveis - Chave na Avaliação da Vulnerabilidade Sísmica			
Demografia	Socioeconomia	Ambiente Construído	Vulnerabilidade dos Solos
Estrutura Etária População Residente <14 anos (crianças); População Residente entre 14 e 64 anos (adultos) e População Residente com 65 ou + anos (idosos)	Nível de Educação Indivíduos com o 1º ou 2º ciclo completo; Indivíduos com o 3º ciclo ou Secundário completo; Indivíduos com o Ensino Superior completo e Indivíduos que não concluíram o Ensino Médio	Ano de Construção Edifícios construídos antes de 1919 até 1945; Edifícios construídos antes de 1946 até 1985 e Edifícios construídos antes de 1986 até 2001	Litologia Depósitos quaternários soltos, de fases mistas; Depósitos quaternários soltos, principalmente de grão fino; Depósitos quaternários coerentes, de fases mistas; Depósitos quaternários coerentes, de grão grosso; Sedimentos neocénicos de grão grosso; Sedimentos neocénicos de fases mistas; Flysch e Rochas
Género População Residente do sexo feminino; População Residente do sexo masculino	Emprego Taxa de Desemprego	Tipo de Construção Edifícios construídos em estruturas de betão armado; Edifícios construídos em estruturas de alvenaria; Edifícios construídos em estrutura de alvenaria de adobe, tijolo e pedra	Liquefação Liquefação
Estado Civil População Residente do sexo feminino viúvas	Índice de Dependência Social Índice de Dependência Social e População Residente Dependente	Número de Pisos Edifícios com 1 ou 2 pisos; Edifícios com 3 ou + pisos e Altura Média dos Edifícios	Aceleração Sísmica Valores médios de aceleração para sismos de média e alta magnitude e PGA
Estrutura Familiar Agregados Familiares com 1 ou 2 indivíduos; Agregados Familiares com 3 ou 4 indivíduos; Agregados Familiares com 5 ou + indivíduos; Mulheres com muitos filhos; Agregados Familiares Monoparentais; População Residente idosa que vivem sozinhos; População Residente estrangeira	Literacia Iliteracia	Tipo de Funções Edifícios que são exclusivamente/principalmente habitações e Edifícios que têm principalmente uma função não residencial	Distância de Falhas Ativas Distância de Falhas Ativas
Densidade Populacional Densidade Populacional (Armas, 2012; Jena et al., 2020; Martins et al., 2012; Rezaie & Panahi, 2015; Walker et al., 2014)	Outros Número médio de assalariados por agregado familiar; Rácio entre rendimentos baixos e rendimentos altos; Renda Média; Pessoas que se mudaram recentemente (Armas, 2012; Jena et al., 2020; Martins et al., 2012; Rezaie & Panahi, 2015; Walker et al., 2014)	Tipo de Ocupação do Alojamento Alojamento clássico ocupado pelo proprietário e Alojamento clássico ocupado por arrendatário	Magnitude dos Sismos Magnitude dos Sismos
Acessibilidade e Segurança Distância de Serviços de Emergência Distância de Quartéis de Bombeiros; Distância de Hospitais; Distância de Esquadras da Polícia; Distância de Estabelecimentos da Proteção Civil		Outras Características dos Alojamentos Área do quarto por pessoa e Área média dos quartos	Curvatura Curvatura
Distância de Locais Perigosos Linhas de transmissão de energia eléctrica de alta tensão; Gasodutos; Estações de gasolina e Indústrias de risco		Densidade Densidade de Edifícios; Densidade de Alojamentos em Edifícios e Densidade Populacional por Residência (Armas, 2012; Jena et al., 2020; Martins et al., 2012; Rezaie & Panahi, 2015)	Declive Declive
Outros Distância de Espaços Verdes; Distância de Espaços Abertos; Distância de Estradas (Armas, 2012; Jena et al., 2020; Rezaie & Panahi, 2015)			Uso do Solo Urbano; Cultivado; Floresta; Zonas Arbustivas; Áreas Áridas; Tecido Urbano Contínuo e Tecido Urbano Descontínuo (Armas, 2012; Bathrellos et al., 2017; Jena et al., 2020; Martins et al., 2012; Nyimbili et al., 2018; Rezaie & Panahi, 2015; Sklodimou et al., 2019; Walker et al., 2014)

Figura 2.3 - Quadro-resumo dos principais critérios, subcritérios e variáveis utilizados na avaliação da vulnerabilidade sísmica, conforme identificados na literatura científica.

A análise da Figura 2.3 evidencia a diversidade de critérios e variáveis considerados na abordagem ao risco sísmico, refletindo a complexidade multidimensional que caracteriza este fenómeno. Torna-se, assim, evidente que o risco sísmico não pode ser compreendido apenas na sua componente física, exigindo antes uma perspetiva integrada que incorpore dimensões demográficas, socioeconómicas, ambientais, entre outras. Tal como referem Bathrellos et al. (2017, p. 120) e Skilodimou et al. (2019, p. 47), os desastres naturais devem ser interpretados como fenómenos não exclusivamente naturais, uma vez que os seus impactos são amplificados por fatores humanos e contextuais. Entre os diferentes critérios, destacam-se particularmente os associados à população e às condições socioeconómicas, cuja influência se tem acentuado face à crescente artificialização dos territórios, expondo de forma mais significativa as comunidades a situações de risco.

Por outro lado, observa-se que o critério “Acessibilidade e Segurança” é menos recorrente na literatura, sendo referenciado por apenas três autores. No entanto, este critério assume particular relevância por estar diretamente relacionado com a capacidade de resposta, evacuação e consciencialização das comunidades e dos serviços de emergência, elementos fundamentais para a redução da vulnerabilidade e para uma gestão eficaz em contextos de crise.

Além disso, constata-se que diferentes autores adotam variáveis distintas nos seus estudos, refletindo não só as especificidades territoriais e sociais dos respetivos contextos de análise, mas também as limitações decorrentes da disponibilidade, acessibilidade e qualidade dos dados utilizados.

3. METODOLOGIA

Concluída a revisão da literatura, inicia-se a fase metodológica, uma etapa fundamental em qualquer investigação científica, por definir, de forma clara e estruturada, as técnicas e os procedimentos a adotar ao longo do estudo. Esta etapa não só orienta a execução da investigação, como também facilita a sua compreensão por parte de terceiros, promovendo a transparência, a reprodutibilidade e a coerência interna do trabalho.

Deste modo, torna-se possível aferir a fiabilidade dos dados recolhidos, sustentar a validade dos resultados obtidos e identificar, de forma rápida, eventuais limitações ou inconsistências, permitindo a sua correção atempada. Para além disso, ao explicitar os métodos utilizados para a recolha, análise e interpretação dos dados, a metodologia assume um papel central na comunicação, funcionando como uma ponte entre o investigador e a comunidade, e contribuindo para o diálogo e a avaliação crítica entre pares (Bahishti, 2022).

Neste contexto, a metodologia deste estudo será organizada em duas secções principais. A primeira apresenta o concelho de Lisboa, justificando a sua escolha como caso de estudo, tendo em conta as suas características geográficas, urbanas e sísmicas (secção 3.1). A segunda descreve a aplicação do método de AHP, adaptado ao contexto académico desta investigação (secção 3.2). Esta última será detalhada em quatro etapas fundamentais: recolha de dados (secção 3.2.1), organização hierárquica do modelo de vulnerabilidade (secção 3.2.2), padronização dos critérios (secção 3.2.3) e estimação dos respetivos pesos com base na literatura científica (secção 3.2.4).

3.1. Caso de Estudo: Concelho de Lisboa

Lisboa, capital de Portugal, constitui-se como um território particularmente vulnerável à ocorrência de sismos, resultado de uma conjuntura de fatores geológicos, demográficos, urbanísticos e históricos. Este concelho localiza-se sobre o limite sudoeste da placa euroasiática, próximo de falhas tectónicas ativas como a Falha de Lisboa e Vale do Tejo (LTVF) e a Falha de Príncipes de Avis (PAF) (Figura 3.1), o que

lhe confere uma instabilidade significativa e, consequentemente, uma elevada predisposição para este tipo de fenómenos (Sociedade Portuguesa de Engenharia Sísmica, 2019; Xofi et al., 2024, p. 243).

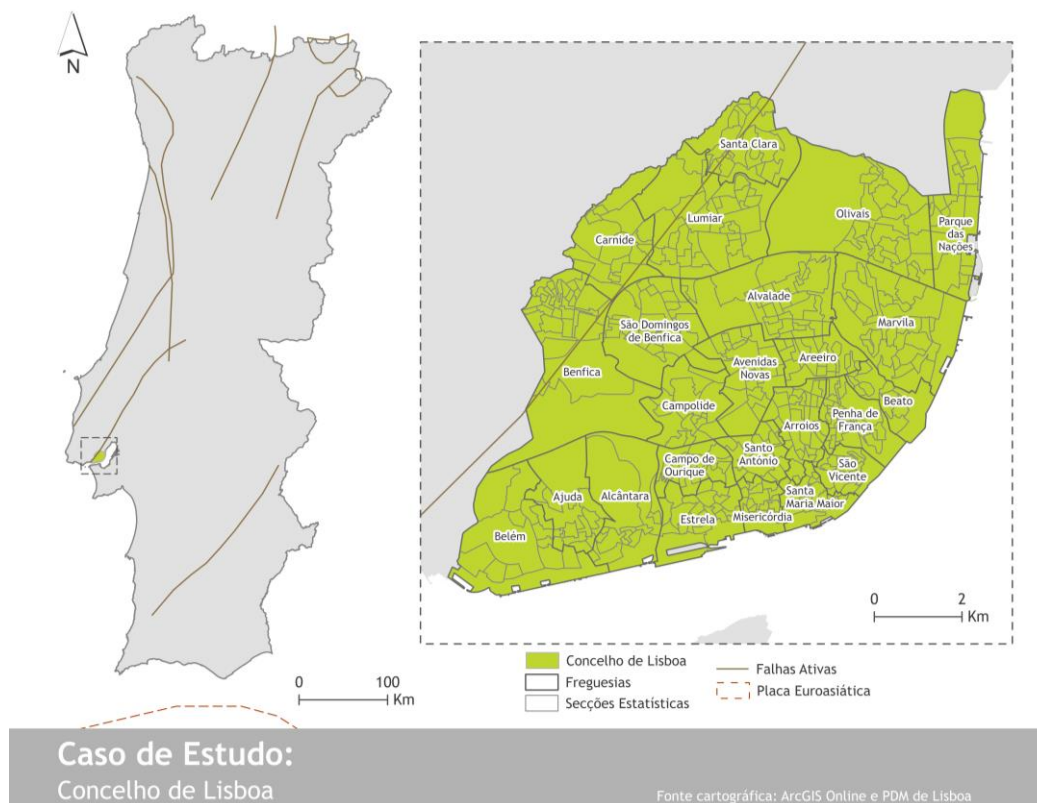


Figura 3.1 - Enquadramento do Concelho de Lisboa.

Para além do contexto geológico, a elevada densidade populacional, o número expressivo de edifícios antigos, o valor patrimonial do edificado e a concentração de infraestruturas críticas, como hospitais, portos e aeroportos, aumentam consideravelmente o risco. Estes elementos encontram-se particularmente expostos a danos, sendo que a sua interrupção poderá originar impactos económicos profundos (Xofi et al., 2024, pp. 245-246).

A vulnerabilidade da cidade é ainda reforçada pelo seu histórico sísmico. O terramoto de 1 de novembro de 1755, que causou destruição em larga escala e alterou profundamente os padrões de crescimento da cidade, continua a ser recordado como um dos eventos mais catastróficos. Mais recentemente, os sismos de 1909 (com epicentro em Benavente), 1969 (com epicentro em Sagres), 2024 (com epicentro em

Sines) e 2025 (com epicentro no Seixal), com magnitudes entre 4.7 a 8 na escala de *Richter*, reiteram a suscetibilidade do território continental a fenómenos sísmicos severos (Ferreira, 2021, pp. 166-172 e 241).

Do ponto de vista urbano, populacional e funcional, Lisboa enfrenta desafios acrescidos devido à sua função metropolitana. O concelho não apenas concentra uma elevada população residente, como também recebe diariamente pessoas provenientes dos concelhos limítrofes, no âmbito dos movimentos pendulares casa-trabalho. Esta intensa mobilidade e a concentração de recursos elevam a complexidade da gestão de risco e da resposta a situações de emergência (Xofi et al., 2024, p. 243).

Neste contexto, dada a pertinência do tema, na secção seguinte apresenta-se a metodologia adotada nesta dissertação.

3.2. Método AHP

O processo de aplicação do método AHP à construção do modelo de vulnerabilidade sísmica envolve um conjunto de etapas estruturadas, que se encontram sintetizadas na Figura 3.2. Estas incluem a seleção e recolha de dados, a organização hierárquica dos critérios, a padronização dos indicadores, a estimação dos pesos com base na literatura e, por fim, a aplicação destes num ambiente SIG para a geração do mapa final de vulnerabilidade da cidade de Lisboa.

A implementação prática deste processo foi realizada no *software ArcGIS Pro*, recorrendo à ferramenta *ModelBuilder*, que permitiu automatizar e integrar os diversos procedimentos de análise espacial (Figura 3.3). Estas duas figuras complementam-se na explicação da metodologia e serão analisadas em detalhe nas secções seguintes deste capítulo.

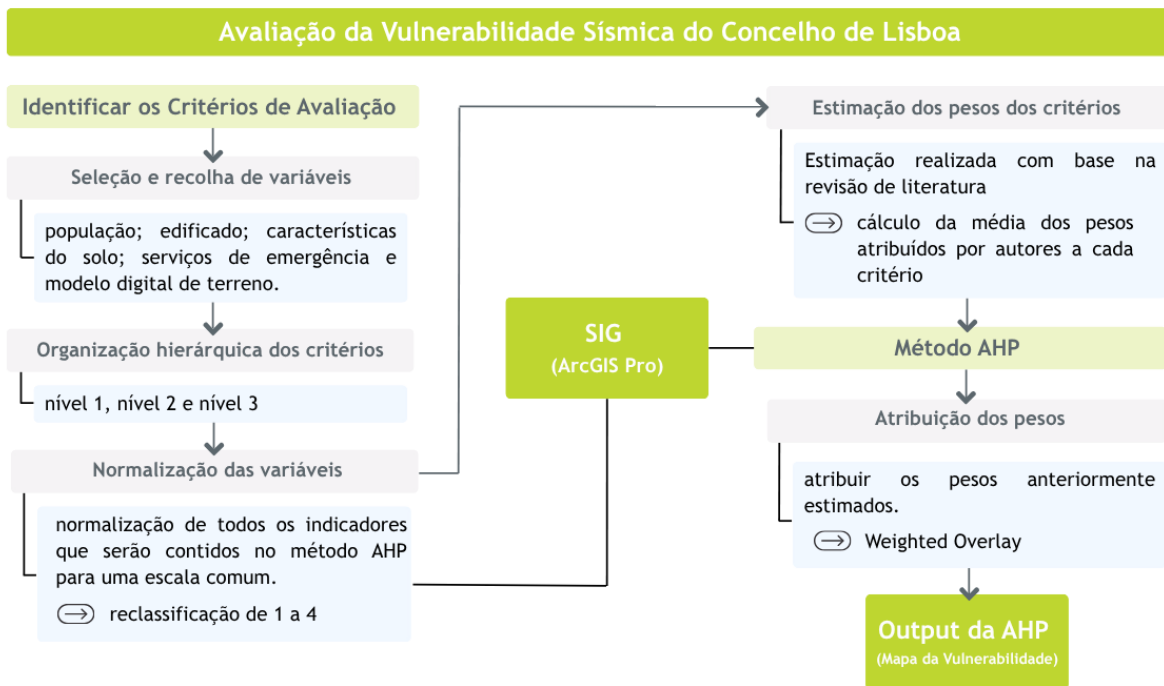


Figura 3.2 - Esquema da metodologia adotada na construção do modelo de vulnerabilidade sísmica com base no método AHP.

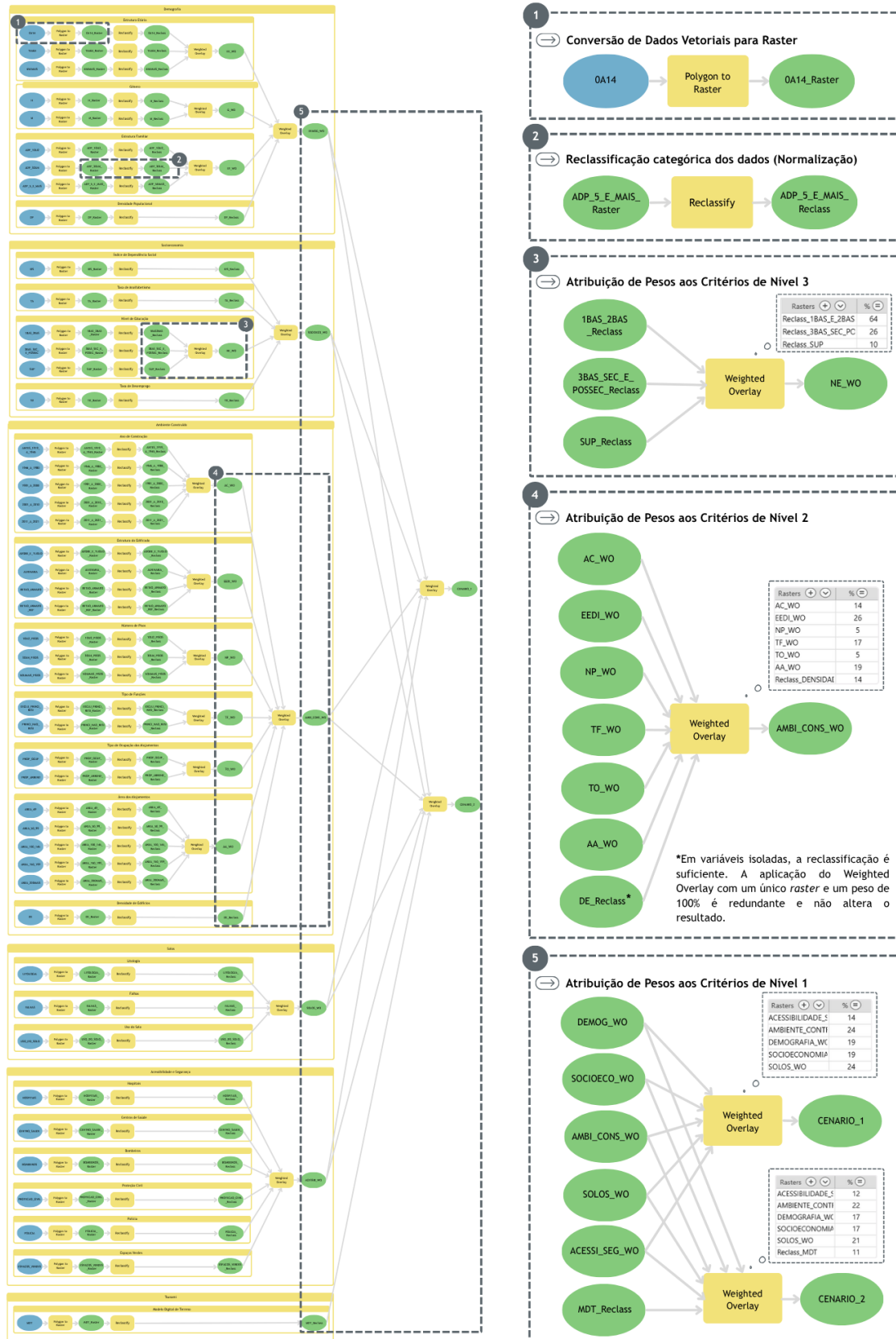


Figura 3.3 - Modelbuilder do Modelo desenvolvido: Método AHP.

3.2.1. Seleção e Recolha de Dados

De acordo com a publicação “*Models, Methods, Concepts & Applications of the Analytic Hierarchy Process*” desenvolvido por Saaty e Vargas (2012, p. 2), o primeiro passo no desenvolvimento do modelo AHP consiste na definição dos fatores a incluir, de modo a garantir que a estrutura hierárquica proposta responda de forma completa ao problema em análise. Esta definição deve considerar os atributos mais relevantes associados à questão em estudo, tendo sempre em conta as especificidades do território onde o modelo será aplicado.

Contudo, no presente trabalho, e tendo em conta o seu enquadramento académico, foi necessário adaptar este método à realidade da investigação. A impossibilidade de envolver diretamente *stakeholders* na definição dos fatores e na atribuição dos respetivos pesos levou à desconstrução parcial do processo original. Assim, optou-se por identificar os critérios e os dados correspondentes com base nas escolhas metodológicas adotadas em estudos científicos prévios sobre vulnerabilidade sísmica.

Neste contexto, o primeiro passo deste projeto correspondeu à seleção e recolha de dados. A partir da análise da literatura, foi elaborada uma lista inicial de variáveis, critérios e atributos frequentemente utilizados por diversos autores. No entanto, foram realizados alguns reajustes. Por um lado, identificaram-se fatores para os quais não existiam dados disponíveis com cobertura adequada para o concelho de Lisboa; por outro, verificou-se que certos critérios, embora recorrentes na literatura, não se adequavam à realidade física, social ou urbana do território em estudo. Simultaneamente, foram ainda incorporadas novas variáveis, com base nas suas características e relevância para o contexto específico da cidade, assegurando a coerência e a pertinência do modelo face à informação disponível.

Assim, a comparação entre os dados utilizados nos artigos selecionados (Armaç, 2012; Bathrellos et al., 2017; Jena et al., 2020; Martins et al., 2012; Rezaie & Panahi, 2015; Skilodimou et al., 2019; Walker et al., 2014) e a informação disponível para o concelho de Lisboa permitiu identificar o conjunto de dados apresentados na tabela 3.1.

Tabela 3.1 - Fontes de dados utilizadas na construção do modelo de vulnerabilidade sísmica de Lisboa.

Fonte/ Plataforma	Base de Dados	Variáveis	Ano	Formato / Escala
Instituto Nacional de Estatística (INE)	Base Geográfica de Referência de Informação (BGRI)	Estrutura etária, género, educação, emprego e edificado	2021	Vetor; Secção Estatística
Laboratório Nacional de Energia e Geologia (LNEG)	Carta Geológica de Portugal	Falhas geológicas e litologia	2010	Vetor; 1:1 000 000
Direção Geral do Território (DGT)	Carta de Uso e Ocupação do Solo	Uso do Solo	2018	Vetor
Geodados Câmara Municipal de Lisboa (CML)	Carta Tipos Solos	Litologia	2016	Vetor
	POISocorro	Serviços de Socorro	2019	Vetor
	POISaude	Serviços de Saúde	2019	Vetor
	Mob_declives	Rede Viária	2020	Vetor
	Ambiente DMEVAE	Espaços Verdes	2018	Vetor
Portal de Dados Abertos da Administração Pública	MDT Lisboa	Elevação	2012	Raster

Os links para consulta das bases de dados encontram-se disponíveis no Anexo A.

Importa salientar que a escala de análise adotada para o presente estudo corresponde à Secção Estatística da BGRI, disponibilizada pelo INE. Esta escolha justifica-se pela necessidade de garantir a inclusão de variáveis relevantes identificadas na literatura, as quais não se encontram disponíveis ao nível da subsecção estatística. Embora esta última ofereça um maior grau de detalhe espacial, a sua limitação em termos de diversidade de indicadores inviabilizaria a construção de um modelo holístico. Assim, optou-se pela Secção Estatística como unidade base.

3.2.2. Organização Hierárquica do Modelo de Vulnerabilidade

Após a recolha e sistematização dos dados para o concelho de Lisboa, iniciou-se a definição da estrutura hierárquica do modelo, com base na seleção criteriosa dos fatores a considerar. Esta estrutura foi delineada segundo as referências bibliográficas e tendo em vista os princípios propostos por Rashed e Weeks (2003, p. 556), que defendem que os elementos utilizados devem ser coerentes com os objetivos do estudo,

quantificáveis, relevantes para a tomada de decisão e organizáveis de forma hierárquica, evitando redundâncias e mantendo apenas o número necessário de elementos para garantir uma representação completa e funcional do problema em análise.

Assim, os critérios foram organizados em diferentes níveis, de acordo com o seu grau de relevância e generalidade, permitindo que elementos mais específicos fossem integrados como subcritérios, sempre que a estrutura do modelo e a natureza dos dados assim o justificassem (Saaty & Vargas, 2012, p. 2).

A Figura 3.4 sintetiza graficamente a estrutura hierárquica do modelo, destacando a decomposição do objetivo geral nos critérios e subcritérios considerados neste estudo.

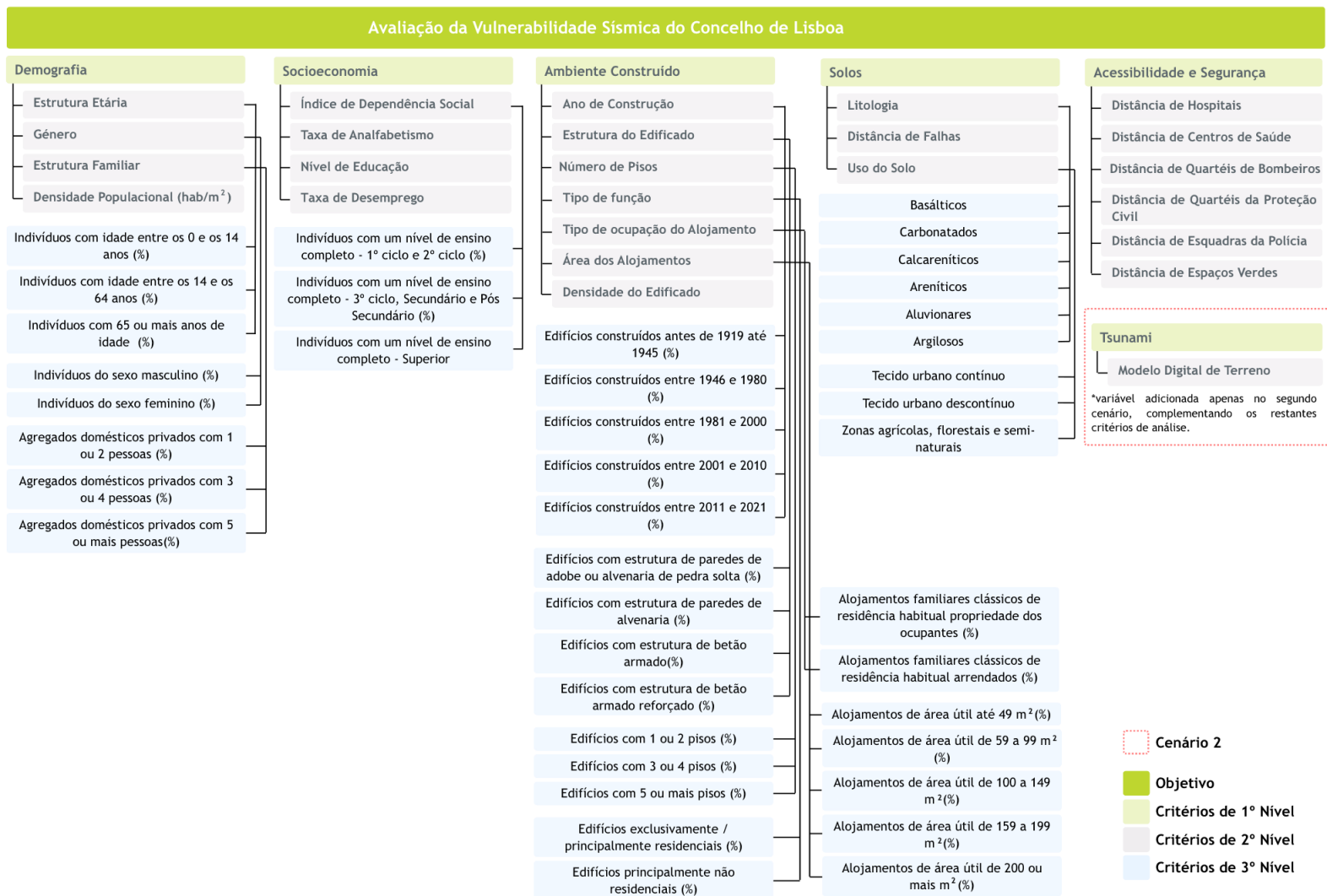


Figura 3.4 - Estrutura Hierárquica do modelo de vulnerabilidade sísmica de Lisboa.

A hierarquia definida foi organizada em seis grandes grupos temáticos: Demográfico, Socioeconómico, Ambiente Construído, Solos e Acessibilidade e Segurança e Tsunami. Cada um destes conjuntos agrega subcritérios específicos que representam diferentes dimensões da vulnerabilidade sísmica, selecionadas com fundamento na literatura científica e na realidade observada.

Os elementos incluídos no modelo foram organizados segundo uma estrutura hierárquica composta por três níveis:

- Critérios de 1.º nível, representam as grandes dimensões da vulnerabilidade (critérios);
- Critérios de 2.º nível, especificam atributos fundamentais dentro de cada dimensão (subcritérios);
- Critérios de 3.º nível, detalham os indicadores observáveis utilizados para análise, com base na informação estatística disponível (variáveis).

Esta organização em níveis permite uma decomposição do problema, facilitando a aplicação do método AHP, garantindo uma representação abrangente das múltiplas componentes envolvidas na avaliação da vulnerabilidade sísmica (Saaty & Vargas, 2012, p. 2).

Nos pontos seguintes, cada grupo é analisado individualmente, com destaque para os fatores que o compõem, a sua relevância no contexto da vulnerabilidade sísmica, as fontes teóricas que sustentam a sua inclusão no modelo, bem como as justificações metodológicas associadas a determinadas decisões.

3.2.2.1. Critério 1: Demografia

Para autores como Armaş (2012), Martins et al. (2012) e Rezaie & Panahi (2015), a dimensão demográfica é reconhecida como um pilar essencial na análise da vulnerabilidade sísmica, uma vez que os territórios são, antes de mais, espaço habitados por populações. Assim, compreender as suas características torna-se fundamental para avaliar o seu grau de fragilidade face à ocorrência de fenómenos sísmicos, dado que fatores desta natureza influenciam diretamente a capacidade de resposta e resiliência das comunidades. Entre os elementos considerados incluem-se

a estrutura etária, o sexo, a dimensão média do agregado familiar e a densidade populacional.

A título de exemplo, segundo a literatura científica, a presença de população idosa e/ou jovem associa-se a uma maior fragilidade física e dependência de apoio externo, enquanto a figura feminina é vista como um grupo particularmente vulnerável. Por sua vez, agregados familiares mais numerosos podem enfrentar dificuldades adicionais em contextos de evacuação e acesso a serviços. Já a densidade populacional pode agravar os impactos de um sismo, sobretudo em áreas urbanas densamente edificadas (Armaş, 2012, p. 1139; Martins et al., 2012, pp. 387-388; Rezaie & Panahi, 2015, p. 469).

3.2.2.2. Critério 2: Socioeconomia

A camada de nível 1 designada como Socioeconomia foi outra das componentes incluídas neste estudo, por permitir averiguar a capacidade económica e social das populações na preparação, resposta e recuperação a eventos como o em estudo. Embora não exista uma variável direta que permita medir o nível de riqueza da população e, por conseguinte, associar esta condição à capacidade de investimento em imóveis mais seguros, é possível recorrer a um conjunto de indicadores indiretos que, em conjunto, permitem inferir este padrão.

Entre os subcritérios considerados incluem-se: o Índice de Dependência da População, a Taxa de Analfabetismo, o Nível de Educação e a Taxa de Desemprego (Armaş, 2012; Martins et al., 2012; Rezaie & Panahi, 2015; Walker et al., 2014).

De um modo geral, níveis mais elevados de escolaridade estão associados a melhores condições de empregabilidade e estabilidade económica, o que pode contribuir para uma maior capacidade de preparação face a desastres naturais. Em contraste, baixos níveis de instrução — refletidos pela taxa de analfabetismo, iliteracia e pela predominância de níveis de escolaridade mais baixos — podem comprometer a compreensão de instruções dadas pelas equipas de emergência ou dificultar o acesso à informação durante e após o evento.

Por sua vez, o Índice de Dependência Social expressa a proporção entre os grupos etários dependentes (crianças e idosos) e a população em idade ativa. Um valor

elevado neste indicador pode representar uma maior carga sobre os grupos ativos, o que, em situações de crise, pode comprometer a rapidez e eficácia da resposta familiar ou comunitária. Para além disso, os grupos dependentes tendem a necessitar de apoio específico em ações de evacuação e assistência, reforçando o seu peso na avaliação da vulnerabilidade (Martins et al., 2012, p. 388; Rezaie & Panahi, 2015, p. 465).

3.2.2.3. Critério 3: Ambiente Construído

O terceiro critério diz respeito ao ambiente construído, fator fundamental para o modelo, uma vez que o território representa não apenas o espaço físico, mas também o conjunto de infraestruturas que acolhem a população. Neste sentido, torna-se essencial considerar as características do edificado.

Entre os subcritérios existentes foram selecionados: o ano de construção, o tipo de estrutura, o número de pisos, a função predominante dos edifícios, o tipo de ocupação, a área dos alojamentos e a densidade de edifícios (Armaş, 2012; Jena et al., 2020; Martins et al., 2012; Rezaie & Panahi, 2015).

Por exemplo, edifícios mais antigos, construídos antes da implementação de regulamentos europeus de segurança estrutural (Eurocódigos Estruturais - especificamente o Eurocódigo 8), e com materiais menos resistentes, tendem a ser mais suscetíveis a danos em caso de sismo. O número de pisos mantém-se um fator relevante, uma vez que estruturas mais altas concentram mais pessoas, exercer maior carga sobre o solo e exigir fundações mais robustas, o que pode aumentar a sua vulnerabilidade, especialmente em solos mais instáveis (Armaş, 2012, p. 1143; Martins et al., 2012, p. 388; Simões & Bento, 2012). Contudo, a área útil dos alojamentos nem sempre está associada a maior risco; segundo Jena et al. (2020, p. 7), a vulnerabilidade tende a diminuir com o aumento da área útil, o que pode refletir melhores condições socioeconómicas e construtivas.

Também o tipo de função dos edifícios exerce influência na vulnerabilidade. Edifícios com funções residenciais tendem a apresentar uma ocupação mais continua durante longos períodos do dia, enquanto edifícios de serviços ou comércio podem ter maior rotatividade de pessoas, mas menor ocupação.

Relativamente ao tipo de ocupação, edifícios habitados pelos seus proprietários são, segundo alguns estudos, mais propensos a intervenções de manutenção e reforço estrutural, comparativamente a edifícios arrendados, nos quais a responsabilização pela conservação pode ser discutível.

Por fim, a densidade de edifícios representa um fator crítico, pois em zonas onde as construções se encontram demasiado próximas entre si, o colapso de uma estrutura pode desencadear danos adicionais nas adjacentes, amplificando os efeitos do sismo em cascata (Martins et al., 2012, p. 388; Rezaie & Panahi, 2015, p. 465).

3.2.2.4. Critério 4: Solos

A dimensão relativa aos solos assume particular importância na modelação da vulnerabilidade sísmica, uma vez que a propagação das ondas sísmicas se reflete diretamente nas características do terreno. A resposta do solo ao movimento sísmico pode amplificar ou atenuar os efeitos sentidos à superfície, dependendo da sua composição e grau de consolidação. Para além disso, é sobre o solo que se distribuem os edifícios, as infraestruturas e as populações, tornando-o um elemento fundamental neste estudo.

Neste contexto, a análise deste critério considera três subcritérios principais: a litologia, a distância a falhas geológicas e o uso do solo (Bathrellos et al., 2017; Jena et al., 2020; Martins et al., 2012; Rezaie & Panahi, 2015; Skilodimou et al., 2019).

De forma ilustrativa, quanto mais finos e menos consolidados forem os materiais que compõem o solo, maior tende a ser a sua vulnerabilidade sísmica, devido à maior amplificação das ondas sísmicas e à menor capacidade de resistência estrutural. Paralelamente, quanto mais próxima for a localização de falhas geológicas ativas, maior será o risco associado. Por fim, áreas com ocupação em tecido urbano contínuo podem apresentar maiores constrangimentos à circulação de meios de emergência, dificultando a resposta imediata e a evacuação em cenários de crise (Martins et al., 2012, pp. 388-389; Skilodimou et al., 2019, pp. 12-13).

3.2.2.5. Critério 5: Acessibilidade e Segurança

Em situações de emergência, como sismos, a rapidez e a eficácia da resposta são cruciais para minimizar perdas humanas e materiais. Assim, este critério visa avaliar

a proximidade e acessibilidade a serviços essenciais, tanto para garantir um socorro imediato à população como para assegurar a operacionalidade dos meios de resposta.

Foram, por isso, considerados como subcritérios: a distância a hospitais, centros de saúde, quartéis de bombeiros, serviços de proteção civil, esquadras da polícia e espaços verdes (Armaş, 2012; Rezaie & Panahi, 2015; Walker et al., 2014).

Por exemplo, a presença de hospitais e centros de saúde nas proximidades pode ser determinante na prestação de cuidados médicos imediatos a vítimas feridas. A proximidade a quartéis de bombeiros ou a serviços de proteção civil facilita a mobilização rápida de equipas de resgate. As esquadras da polícia, por sua vez, podem ter um papel essencial na manutenção da ordem pública e no apoio logístico durante as operações de emergência. Já os espaços verdes podem funcionar como zonas de concentração ou áreas de abrigo temporário em contextos de elevada destruição urbana (Walker et al., 2014, pp. 1213-1215).

3.2.2.6. Critério 6: Tsunami

Por último, o critério Tsunami será incorporado apenas num segundo cenário do modelo, tendo em conta o contexto histórico e científico associado. Esta decisão baseia-se no facto de o território português ter sido gravemente afetado pelo sismo de 1755, que foi seguido por um tsunami de grande escala, e nos alertas de especialistas que reconhecem a possibilidade de ocorrência futura de um evento com repercussões semelhantes (Amorim, 2023; Mandeiro & Palma, 2025).

Para este cenário, foi integrada o indicador elevação, obtida a partir do MDT, com o objetivo de identificar as áreas potencialmente mais expostas à inundação costeira em caso de *tsunami*. A altitude foi utilizada como indicador de vulnerabilidade, assumindo-se que zonas de altitude mais baixas apresentam maior probabilidade de serem afetadas pela propagação da onda (Autoridade Nacional de Emergência e Proteção Civil, 2021, p. 13).

3.2.3. Padronização dos Critérios de Vulnerabilidade

Finalizada a organização hierárquica dos critérios de vulnerabilidade, tornou-se necessário preparar os dados para análise multicritério, assegurando a sua compatibilidade para posteriores comparações e sobreposições. Embora na figura 3.4 os critérios se encontrem já representados de forma estruturada e normalizada, este aspeto corresponde a uma fase posterior do processo, tendo em conta o contexto académico que motivou uma adaptação à sequência metodológica clássica (Martins et al., 2012, p. 393).

Neste sentido, esta secção pretende descrever o processo de standardização aplicado aos dados recolhidos, estando subdividida em duas partes: uma primeira dedicada à padronização espacial (sistema de coordenadas) (secção 3.2.3.1), e uma segunda relativa à padronização temática, onde se procede à normalização estatística das variáveis, quer de natureza numérica, quer de natureza qualitativa ou classificada (secção 3.2.3.2).

3.2.3.1. Espacial - Sistema de Coordenadas

Em qualquer estudo baseado em SIG, uma das primeiras etapas consiste na realização de uma análise exploratória dos dados. Esta etapa torna-se especialmente importante quando se trabalha com dados provenientes de múltiplas fontes institucionais, dado que é comum encontrarem-se em diferentes sistemas de coordenadas, o que inviabiliza a sua integração.

Neste contexto, a primeira fase da padronização consistiu na identificação e harmonização espacial de todas as camadas de informação mencionadas na Tabela 3.2, através da sua reprojeção para um sistema de coordenadas comum: o ETRS89 / Portugal TM06. A escolha deste sistema justifica-se por ser o sistema de referência oficial para Portugal continental, adotado pela DGT para a produção de cartográfica nacional. (Direção Geral do Território, s.d)

Este procedimento foi fundamental para garantir a compatibilidade entre as diferentes fontes, prevenindo desalinhamentos, erros de sobreposição e imprecisões na integração dos dados num ambiente SIG.

A Tabela 3.2 apresenta os sistemas de coordenadas originais das bases de dados utilizadas.

Tabela 3.2 - Sistemas de coordenadas originais das fontes de dados utilizadas no modelo de vulnerabilidade sísmica

Fonte/ Plataforma	Base de Dados	Sistema de Coordenadas
Instituto Nacional de Estatística (INE)	Base Geográfica de Referenciação de Informação (BGRI)	ETRS 1989 Portugal TM06
Laboratório Nacional de Energia e Geologia (LNEG)	Carta Geológica de Portugal	ETRS 1989 Portugal TM06
Direção Geral do Território (DGT)	Carta de Uso e Ocupação do Solo	ETRS 1989 Portugal TM06
GeoDados Câmara Municipal de Lisboa (CML)	Carta Tipos Solos	Datum 73 Hayford Gauss IPCC
	POISocorro	WGS 1984 Web Mercator (auxiliary sphere)
	POISaude	WGS 1984 Web Mercator (auxiliary sphere)
	Mob_declives	ETRS 1989 Portugal TM06
	Ambiente DMEVAE	WGS 1984 Web Mercator (auxiliary sphere)
Portal de Dados Abertos da Administração Pública	MDT Lisboa	ETRS 1989 Portugal TM06

3.2.3.2. Temática

Garantida a coesão espacial, torna-se necessário padronizar a componente temática dos dados, ou seja, a informação descritiva associada aos elementos espaciais. Esta necessidade advém do facto de as variáveis originais se encontrarem expressas em unidades distintas, o que inviabilizaria a sua comparação direta.

Neste sentido, este ponto é essencial para relacionar estatisticamente os diferentes critérios de vulnerabilidade e possibilitar a sua integração num sistema de avaliação comum. Para tal, foram adotadas estratégias de padronização ajustadas ao tipo de variáveis em análise — não censitárias ou censitárias —, tal como se descreve nos pontos seguintes.

a) Variáveis Não Censitárias

As variáveis não censitárias referem-se aos dados provenientes de fontes de natureza geoespacial, e cuja estrutura original não se apresenta em valores absolutos passíveis de conversão direta em percentagens. Estas variáveis, como a litologia, o uso do solo, a distância a falhas geológicas, a distância a hospitais, a centros de saúde, quartéis de bombeiros, proteção civil, esquadras de polícia, classificadas em categorias qualitativas ou escalas contínuas específicas (ex.: metros, quilómetros, ...).

Dado que não é possível aplicar uma normalização direta, como a conversão para percentagens, procedeu-se à reclassificação destas variáveis numa escala comum de 1 a 4, representando diferentes níveis de vulnerabilidade sísmica, conforme definido na literatura científica (Tabela 3.3).

Tabela 3.3 - Escala de classificação da vulnerabilidade sísmica. Adaptado de (Rezaie & Panahi, 2015, p. 466; Saaty & Vargas, 2012, p. 6)

Grau	Significado
1	Vulnerabilidade sísmica baixa , ou seja, condições que oferecem maior segurança ou com menor propensão a agravar os efeitos de um sismo
2	Vulnerabilidade sísmica moderada , isto é, condições intermédias que podem apresentar algum risco, mas não de forma significativa
3	Vulnerabilidade sísmica elevada , ou seja, condições que podem contribuir para um agravamento dos efeitos em caso de evento sísmico
4	Vulnerabilidade sísmica muito elevada , ou seja, situações críticas, propensas a consequências mais severas

Antes da reclassificação, algumas variáveis exigiram tratamentos específicos para garantir a fiabilidade dos resultados:

Litologia: As classificações disponíveis nas bases de dados, selecionadas para avaliar a vulnerabilidade dos solos a nível litológico, não correspondiam diretamente às tipologias de solo mais comuns na literatura (Bathrellos et al., 2017; Kolat et al., 2012; Skilodimou et al., 2019). Para ultrapassar esta limitação, procedeu-se à integração da Carta Geológica de Portugal (LNEG) com a Carta de Tipos de Solo (CML), utilizando a sobreposição com transparência no *ArcGIS Pro*. Esta operação permitiu criar uma variável que associa sistemas geológicos à sua granulometria, inferindo o comportamento sísmico dos solos. Esta solução não só aumentou o nível

de detalhe da análise, como também permitiu considerar outras variáveis, indiretamente, como por exemplo a potencial liquefação dos solos, ou seja, a sua transformação de estado sólido para líquido devido à perda de resistência durante a propagação sísmica. Por esta razão, variáveis redundantes, como as propostas por Nyimbili et al. (2018) e Walker et al. (2014), foram excluídas do modelo, evitando duplicações.

Distância a falhas: Em vez de considerar apenas a presença da falha, como é o caso de estudos como o de Bathrellos et al. (2017) ou Skilodimou et al. (2019) que lhe atribuem diretamente o valor máximo de vulnerabilidade, optou-se por calcular a distância entre cada secção estatística e a falha ativa sobre Lisboa, a partir da ferramenta *Near*. Este método permite representar de forma mais realista a variação da exposição ao risco. A classificação dos valores foi realizada por intervalos de distância, refletindo diferentes níveis de vulnerabilidade conforme a proximidade à falha.

Acessibilidade a serviços de emergência: Foi utilizada a ferramenta *Closest Facility* do *ArcGIS Pro*, com base na rede viária, para calcular a distância entre cada secção estatística (convertida em ponto) e os seguintes equipamentos: hospitais, centros de saúde, quartéis de bombeiros, esquadras da polícia e unidades de proteção civil. O resultado deste cálculo é convertido para polígono a partir de um *join* e em seguida procede-se à sua reclassificação de 1 a 4 permitiu integrar esta dimensão no modelo.

Importa destacar a inclusão dos centros de saúde, não mencionados explicitamente na literatura, mas cuja importância é particularmente relevante no contexto português pós-pandemia, devido à sobrecarga hospitalar. A sua ponderação foi ajustada em consonância com a hierarquia proposta para esta dimensão.

Espaços verdes: Estes foram avaliados como potenciais locais de abrigo em caso de sismo. Com base nas recomendações de Yao et al (2021, p. 2), apenas foram considerados válidos os espaços com área superior ou igual a 400 m², assumindo que um espaço passa a poder ser considerado de abrigo a partir do momento em que a sua capacidade permite acolher, no mínimo, 200 pessoas, com 2 m² por pessoa.

b) Variáveis Censitárias

As variáveis de carácter censitário, correspondentes exclusivamente à BGRI de 2021, integram as dimensões demográfica, socioeconómica e ambiente construído, como por exemplo o número de indivíduos, edifícios, agregados familiares, entre outros. Como se apresentavam em valores absolutos, procedeu-se à sua transformação em proporções, convertendo-as em percentagens.

Este processo de normalização permitiu expressar os dados numa escala comum (0%-100%), garantindo que o contributo de cada variável para a análise de vulnerabilidade não estivesse enviesado por diferenças demográficas ou espaciais. As fórmulas aplicadas para esta conversão encontram-se sistematizadas no Apêndice A.

No entanto, é importante destacar dois casos específicos que exigiram uma abordagem pré-padronização:

Estrutura Familiar: Foi adotada a tipologia proposta por Martins et al. (2012), baseada em variáveis censitárias, para distinguir os tipos de agregados familiares. Esta classificação oferece um nível de detalhe superior face a abordagens mais simplificadas, como as de Armaş (2012) – que utiliza o número médio de pessoas por agregado – ou Walker et al. (2014) – que se baseia na percentagem de famílias monoparentais. Embora úteis em determinados contextos, não proporcionam o mesmo nível de detalhe e discriminação que a classificação seleccionada proporciona.

Estrutura do Edificado: Observou a dificuldade de obtenção direta deste subcritério, dado que esta variável constava na BGRI de 2011, mas não foi recolhida no Censo de 2021. Contactado o INE, confirmou-se que os dados não estavam disponíveis. Dada a sua importância, evidenciada por Martins et al. (2012), que lhe atribuíram o maior peso da sua análise multicritério (0,5007), optou-se por inferir a estrutura dos edifícios com base no ano de construção, utilizando a classificação tipológica proposta por Simões & Bento (2012, p. 3). A tipologia original foi adaptada em quatro fases construtivas, de acordo com os intervalos temporais da BGRI:

- 1ª fase (até 1945) - Pombalina/Gaioleira, com edifícios de alvenaria de pedra, madeira e pontualmente o uso de aço e cerâmica;

- 2ª fase (1946-1960) - Placa, com edifícios de alvenaria com lajes em betão;
- 3ª fase (1961-1990) - Betão Armado, que tal como o nome indica corresponde a edifícios com estruturas de betão armado
- 4ª fase (1991-2021) - Betão Armado Reforçado, com edifícios de estruturas mais robustas e resistentes que os da fase anterior.

Apesar de a transformação em percentagens garantir a homogeneidade estatística das variáveis censitárias, tal não bastava para integrá-las diretamente no modelo, uma vez que as variáveis não censitárias haviam sido previamente reclassificadas numa escala discreta de 1 a 4. Assim, numa segunda fase, e conforme ilustrado na Figura 3.3, que representa o *ModelBuilder* desenvolvido para operacionalizar o modelo, todas as variáveis censitárias foram igualmente reclassificadas para essa escala comum, mantendo o mesmo significado já definido na Tabela 3.3.

Este conjunto de procedimentos assegurou que todas as variáveis, censitárias e não censitárias, fossem integradas de forma coerente e comparável no modelo de avaliação multicritério.

3.2.4. Estimação dos Pesos dos Critérios de Vulnerabilidade

A última fase do processo de modelação da vulnerabilidade sísmica corresponde à atribuição de pesos a todos os critérios, ou seja, à definição da importância relativa de cada variável para o modelo (Martins et al., 2012, pp. 393-395).

Tal como descrito na revisão de literatura, o método AHP permite estimar estes pesos através de comparações par a par entre os critérios. Contudo, no presente estudo, a ausência de um conjunto de *stakeholders* inviabilizou a aplicação prática deste procedimento.

Assim, recorreu-se à adoção de pesos previamente definidos na literatura, com base em estudos de referência identificados nos capítulos anteriores. Para os critérios com um único valor identificado, esse foi diretamente assumido. No caso de critérios com múltiplos pesos atribuídos por diferentes autores, foi calculada a média aritmética, garantindo um valor representativo.

Os pesos finais adotados encontram-se sistematizados na Tabela 3.4, 3.5 e 3.6 e os respectivos cálculos nos Anexos B, C e D.

Tabela 3.4 - Pesos atribuídos aos Critérios de Vulnerabilidade Sísmica (níveis 2 e 3)

	Critérios, Subcritérios e Indicadores	Peso	Autor(es) de Referência
Demografia	Estrutura Etária	0,3483	(Martins et al., 2012; Rezaie & Panahi, 2015)
	Nº de indivíduos com idade entre os 0 e os 14 anos (%)	0,4565	
	Nº de indivíduos com idade entre os 15 e os 64 anos (%)	0,0870	
	Nº de indivíduos com 65 ou mais anos de idade (%)	0,4565	
	Gênero	0,0938	(Martins et al., 2012)
	Nº de indivíduos do sexo masculino (%)	0,2890	
	Nº de indivíduos do sexo feminino (%)	0,7110	
	Estrutura Familiar	0,2766	
	Nº de agregados domésticos privados com 1 ou 2 pessoas (%)	0,4286	(Martins et al., 2012)
	Nº de agregados domésticos privados com 3 ou 4 pessoas (%)	0,1429	
	Nº de agregados domésticos privados com 5 ou mais pessoas (%)	0,4286	
	Densidade Populacional (hab/m²)	0,2813	(Martins et al., 2012; Rezaie & Panahi, 2015)
	Densidade Populacional (hab/m²)	1	
Socioeconomia	Índice de Dependência Social	0,2730	(Martins et al., 2012; Walker et al., 2014)
	Índice de Dependência Social	1	
	Taxa de Analfabetismo	0,2672	(Martins et al., 2012)
	Nº de indivíduos sem nenhum nível de ensino completo (%)	1	
	Nível de Educação	0,3083	(Martins et al., 2012)
	Nº de indivíduos com um nível de ensino completo - 1º ciclo e 2º ciclo (%)	0,6370	
	Nº de indivíduos com um nível de ensino completo - 3º ciclo, Secundário e Pós-Secundário (%)	0,2583	
	Nº de indivíduos com um nível de ensino completo - Superior (%)	0,1047	
	Taxa de desemprego	0,1515	(Martins et al., 2012; Rezaie & Panahi, 2015; Walker et al., 2014)
	Taxa de desemprego	1	
Ambiente Construído	Ano de Construção	0,1440	(Martins et al., 2012)
	Nº de edifícios construídos antes de 1919 até 1945 (%)	0,6103	
	Nº de edifícios construídos entre 1946 e 1980 (%)	0,2475	
	Nº de edifícios construídos entre 1981 e 2000 (%)	0,1003	
	Nº de edifícios construídos entre 2001 e 2010 (%)	0,0318	
	Nº de edifícios construídos entre 2011 e 2021 (%)	0,0102	
	Estrutura do Edificado	0,2591	(Martins et al., 2012)
	Nº de edifícios construídos em adobe, tijolo de terra e estruturas de alvenaria de pedra (%)	0,6165	
	Nº de edifícios construídos com estruturas de alvenaria (%)	0,2500	
	Nº de edifícios construídos com estruturas de betão armado (%)	0,1013	
	Nº de edifícios construídos com estruturas de betão armado reforçado (%)	0,0321	
	Número de Pisos	0,0453	(Martins et al., 2012)
	Nº de edifícios com 1 ou 2 pisos (%)	0,2034	

Tabela 3.5 - Pesos atribuídos aos Critérios de Vulnerabilidade Sísmica (níveis 2 e 3)
(continuação)

	Critérios, Subcritérios e Indicadores	Peso	Autor(es) de Referência
Ambiente Construído (continuação)	Nº de edifícios com 3 ou 4 pisos (%)	0,3333	(Martins et al., 2012)
	Nº de edifícios com 5 ou mais pisos (%)	0,4632	
	Tipo de função	0,1670	
	Nº de edifícios exclusivamente/principalmente residenciais (%)	0,6210	(Martins et al., 2012)
	Nº de edifícios principalmente não residenciais (%)	0,3790	
	Tipo de ocupação do alojamento	0,0453	
	Nº de alojamentos familiares clássicos de residência habitual propriedade dos ocupantes (%)	0,3790	(Martins et al., 2012)
	Nº de alojamentos familiares clássicos de residência habitual arrendados (%)	0,6210	
	Área dos Alojamentos	0,1945	
	Nº de alojamentos familiares clássicos de residência habitual, por escalão da área útil do alojamento até 49 m ² (%)	0,3000	(Jena et al., 2020)
	Nº de alojamentos familiares clássicos de residência habitual, por escalão da área útil do alojamento de 50 a 99 m ² (%)	0,2500	
	Nº de alojamentos familiares clássicos de residência habitual, por escalão da área útil do alojamento de 100 a 149 m ² (%)	0,2000	
	Nº de alojamentos familiares clássicos de residência habitual, por escalão da área útil do alojamento de 150 a 199 m ² (%)	0,1500	
	Nº de alojamentos familiares clássicos de residência habitual, por escalão da área útil do alojamento de 200 ou mais m ² (%)	0,1000	
	Densidade do Edificado	0,1448	
	Densidade do Edificado	1	(Jena et al., 2020; Rezaie & Panahi, 2015)
Solos	Litologia	0,4942	(Bathrellos et al., 2017; Kolat et al., 2012; Skilodimou et al., 2019)
	Litologia	1	
	Distância a Falhas	0,2550	
	Distância a Falhas	1	(Bathrellos et al., 2017; Skilodimou et al., 2019)
	Uso do Solo	0,2508	(Martins et al., 2012)
	Uso do Solo	1	
Acessibilidade e Segurança	Distância de Hospitais	0,1260	(Rezaie & Panahi, 2015)
	Distância de Hospitais	1	
	Distância de Centros de Saúde	0,1090	-
	Distância de Centros de Saúde	1	
	Distância de Quartéis de Bombeiros	0,2020	(Rezaie & Panahi, 2015)
	Distância de Quartéis de Bombeiros	1	
	Distância da Proteção Civil	0,064	(Rezaie & Panahi, 2015)
	Distância da Proteção Civil	1	
	Distância de Esquadras da Polícia	0,2230	(Rezaie & Panahi, 2015)
	Distância de Esquadras da Polícia	1	
Tsunami	Distância de Espaços Verdes	0,2720	(Armaş, 2012; Rezaie & Panahi, 2015)
	Distância de Espaços Verdes	1	
	Modelo Digital de Terreno	-	(Autoridade Nacional de Emergência e Proteção Civil, 2021)
	Modelo Digital de Terreno	1	

Tabela 3.6 - Pesos atribuídos aos Critérios de Vulnerabilidade Sísmica (nível 1)

Critérios, Subcritérios e Indicadores		Peso	Autor(es) de Referência
Cenário 1	Demografia	0,19	(Jena et al., 2020; Rezaie & Panahi, 2015)
	Socioeconomia	0,19	
	Ambiente Construído	0,24	
	Solos	0,24	
	Acessibilidade e Segurança	0,14	
Cenário 2	Demografia	0,17	(Jena et al., 2020; Rezaie & Panahi, 2015; Skilodimou et al., 2019)
	Socioeconomia	0,17	
	Ambiente Construído	0,21	
	Solos	0,21	
	Acessibilidade e Segurança	0,12	
	Tsunami	0,11	

3.2.4.1. Adaptações Metodológicas dos Pesos

A construção do modelo de avaliação de vulnerabilidade sísmica da cidade de Lisboa exigiu diversos ajustes aos critérios e indicadores utilizados, quer devido a alterações na estrutura dos dados disponíveis (nomeadamente a atualização da BGRI de 2011 para a BGRI de 2021), quer pela inclusão de variáveis adicionais consideradas relevantes para o contexto urbano e socioeconómico atual. Os procedimentos para estas reestruturações são:

Ano de Construção: No modelo de Martins et al. (2012), a variável Ano de Construção encontra-se segmentada por intervalos temporais baseados na BGRI de 2011, diferentes dos atualmente disponibilizados pela BGRI de 2021. Para assegurar a compatibilidade com o modelo original, foi necessário reajustar os pesos.

Este processo desenvolveu-se em duas etapas: a aproximação dos intervalos da BGRI de 2021 aos utilizados pelos autores, preservando a lógica de maior vulnerabilidade associada a edifícios mais antigos. Para os intervalos mais recentes (2001 - 2010 e 2011 - 2021), aplicou-se um decréscimo progressivo, com base nos padrões observados nas classes anteriores. Em seguida, uma vez que a soma dos pesos inicialmente atribuídos totalizava 1,044, foi normalizada para 1, assegurando a consistência da escala relativa utilizada no modelo.

Estrutura do Edificado: Aplicou-se uma lógica semelhante à do indicador anterior, tendo sido necessário incorporar uma nova categoria ausente no modelo de referência (Martins et al., 2012) — a estruturas de betão armado reforçado —

resultante da atualização dos materiais de construção em edifícios. O peso correspondente foi atribuído com base num decréscimo proporcional ao da categoria anterior (estrutura de betão armado), respeitando o pressuposto de que estruturas mais recentes e robustas apresentam menor vulnerabilidade.

Número de Pisos: No estudo de Martins et al. (2012), a variável Número de Pisos está dividida em duas classes: edifícios com 1 a 2 pisos (com um peso de 0,3790) e edifícios com 3 ou mais pisos (com um peso de 0,6210), refletindo a estrutura da BGRI de 2011.

A BGRI de 2021 permite uma subdivisão adicional: 3 ou mais pisos e 5 ou mais pisos. Para redistribuir o peso original de 0,6210 entre estas duas novas categorias, considerou-se o acréscimo de vulnerabilidade de cerca de 0,2420 por classe. Aplicando este raciocínio, obteve-se a seguinte distribuição:

- 1-2 pisos: 0,3790 (inalterado)
- 3-4 pisos: 0,6210 (inalterado)
- 5 ou mais pisos: 0,8630

A soma total dos pesos (1,86) foi normalizada, dividindo cada valor pelo total, de modo a garantir uma escala comum com as restantes variáveis.

Área dos Alojamentos: No estudo de Jena et al. (2020), é atribuída menor vulnerabilidade a alojamentos com maior área útil, assumindo que estes refletem melhores condições socioeconómicas e, possivelmente, maior qualidade construtiva. Como o autor apenas atribui peso à variável num nível agregado, neste estudo optou-se por distribuir os pesos de forma decrescente por escalões de área, assumindo uma redução progressiva de 0,05 por classe.

Hospitais, Centros de Saúde, Bombeiros, Proteção Civil, Polícia, Espaços Verdes: Os pesos destes indicadores foram reestruturados por duas razões. A variável Rede Viária foi eliminada, uma vez que esta se encontrava incorporada no cálculo das distâncias, a partir do *Network Analysis - Closest Facilities*. Por outro lado, foi adicionada a variável Distância a Centros de Saúde, justificada pelo papel crescente destes serviços na resposta a situações de menor gravidade em Portugal, que se prevê também relevante em cenários pós-sísmicos.

A redistribuição dos pesos foi realizada da seguinte forma:

- Centros de Saúde: assume o peso anteriormente atribuído aos Hospitais;
- Hospitais: assume o peso anteriormente atribuído aos Bombeiros;
- Bombeiros: assume o peso anteriormente atribuído às Esquadras da Polícia;
- Polícia: assume o peso anteriormente atribuído à Rede Viária.

Esta adaptação garantiu a inclusão de todos os serviços essenciais num cenário de emergência, sem alterar a ponderação atribuída pelo autor Rezaie & Panahi (2015).

4. ESTUDO EMPÍRICO

A construção de um modelo, mesmo quando suportada por uma metodologia sólida e criteriosamente definida, perde parte do seu valor se não estiver claramente associado aos objetivos que se pretende alcançar. Mais do que um exercício técnico, é essencial compreender as intenções que orientam a sua criação, os aspetos da realidade que se procuram representar e as conclusões que se ambiciona extrair com a sua aplicação. Assim, este capítulo tem como finalidade enquadrar o problema empírico que justifica a aplicação do modelo à cidade de Lisboa, bem como explicitar as hipóteses que orientarão a análise dos resultados.

Neste sentido, a presente secção encontra-se dividida em duas subsecções: a primeira dedicada à Formulação e Contextualização do Problema (4.1) e a segunda, centrada nas Hipóteses de Investigação (4.2).

4.1. Formulação e Contextualização do Problema

Dada a conjuntura de desafios que Lisboa apresenta - conforme descrito na secção 3.1 da Metodologia - a sua localização geográfica, numa região próxima de falhas e placas tectónicas, aliada a um património histórico e arquitetónico marcado por edifícios antigos, monumentos vulneráveis e infraestruturas críticas -, torna esta análise uma investigação crucial para a segurança e resiliência da capital portuguesa. Esta necessidade torna-se ainda mais evidente tendo em conta o aumento da atividade sísmica registado no país no último ano, com a ocorrência de dois sismos de intensidade consideráveis que não passaram despercebidos pela população: um a 26 de agosto de 2024, com uma magnitude de 5,3 na escala de *Richter* (Instituto Português do Mar e da Atmosfera, 2024), e outro a 17 de fevereiro de 2025, com uma magnitude de 4,7, este último com epicentro no concelho do Seixal, relativamente próximo do Concelho de Lisboa (Instituto Português do Mar e da Atmosfera, 2025).

Para além do contexto físico e da recente atividade sísmica, importa também considerar a componente histórica: o terramoto de 1755, cuja memória permanece profundamente enraizada na perceção do risco sísmico. Ainda que este evento não tenha sido vivido pelas gerações atuais, a sua possível repetição continua a alimentar

um receio generalizado, frequentemente amplificado por discursos mediáticos. Um exemplo disso é a afirmação de Francisco Mota de Sá, divulgada pela CNN Portugal, que, após 175 dias de intervalo entre os dois últimos sismos, declarou: *“Com uma proximidade destas, tão pequena, isto significa um risco de destruição semelhante ao do terramoto de 1755 – mesmo que com menor magnitude.”* (Mandeiro & Palma, 2025).

Neste sentido, a análise da vulnerabilidade sísmica de Lisboa aqui desenvolvida não se limita a evidenciar a importância das TIG para estas questões, nem à simples identificação de áreas mais ou menos vulneráveis ao perigo sísmico. Pretende-se, acima de tudo, compreender em que medida os resultados obtidos através do modelo poderão confirmar ou refutar algumas das premissas amplamente divulgadas na esfera pública, nomeadamente aquelas que apontam para cenários de colapso generalizado do edificado ou de inoperacionalidade dos serviços de emergência em caso de sismo.

Ainda que estas premissas tenham origem em declarações públicas difundidas nos meios de comunicação social, não constituindo, por isso, evidência científica formal, a sua análise ganha pertinência quando enquadrada às características reais da cidade de Lisboa e dos fatores de vulnerabilidade identificados na literatura científica (Autoridade Nacional de Emergência e Proteção Civil, 2021; Bathrellos et al., 2017; Jena et al., 2020; Kolat et al., 2012; Martins et al., 2012; Rezaie & Panahi, 2015; Skilodimou et al., 2019; Walker et al., 2014). Com base em critérios como o ano de construção e estrutura do edificado, a natureza dos solos, a acessibilidade aos serviços de socorro, a distribuição da população, entre outros, os autores de referência têm identificado padrões de vulnerabilidade que, aplicados ao contexto lisboeta, permitem antecipar a possibilidade de ocorrência dos cenários descritos mediaticamente. Assim, o presente estudo procura contribuir para uma avaliação dessas percepções.

4.2. Hipóteses de Investigação

Tendo em conta a contextualização dada, as hipóteses apresentadas nesta investigação foram formuladas com base em algumas das afirmações de especialistas divulgadas nos media. Estas afirmações, embora baseadas em entrevistas com

especialistas, tendem, por vezes a alarmar a sociedade, moldando a perceção pública sobre a vulnerabilidade sísmica da cidade de Lisboa. Neste sentido a sua verificação constitui uma oportunidade para confrontar estas narrativas com os resultados obtidos a partir do modelo aqui desenvolvido.

As hipóteses em análise são:

1. Na eventual ocorrência de um sismo em Lisboa, metade dos prédios em colapsa;

A Hipótese 1 baseia-se numa declaração de José Paulo Costa ao *Diário de Notícias* (Amorim, 2023), na qual afirma: “*Metade dos prédios que existem em Lisboa não resistem a um sismo!*”. Para avaliar a veracidade desta premissa, serão consideradas duas componentes fundamentais para a modelação da vulnerabilidade estrutural: o ambiente construído e os solos. Tal como descrito anteriormente, o ambiente construído refletirá as características estruturais dos edifícios, enquanto a natureza dos solos influenciará significativamente o comportamento das estruturas face à propagação das ondas sísmicas, podendo amplificar os seus efeitos e contribuir para o colapso das construções.

Neste sentido, com base nestas duas componentes, será desenvolvido um modelo específico, ao qual serão atribuídos os mesmos pesos definidos no modelo geral, mas normalizados, de forma a assegurar a coerência metodológica. O resultado será convertido de *raster* para polígono, de modo a permitir a análise espacial com base nas subsecções estatísticas da BGRI de 2021.

Na fase seguinte, serão identificadas as subsecções que intersem áreas classificadas com vulnerabilidade elevada (nível 3). A escolha da condição “intersem” justificar-se-á pelo facto de, em contextos urbanos densos, o colapso de um edifício poder provocar efeitos estruturais em construções adjacentes, mesmo que estas se encontrem apenas parcialmente dentro da zona de maior risco (Martins et al., 2012, p. 388; Rezaie & Panahi, 2015, p. 465).

Por fim, será calculada a percentagem de edifícios presentes nestas subsecções em relação ao total de edifícios existentes no concelho, com o objetivo de estimar a proporção potencial de construções suscetíveis ao colapso.

De salientar que a utilização das subsecções estatísticas, em detrimento das secções, é justificada pela sua maior resolução espacial, o que permitirá uma representação mais precisa do fenómeno e reduzirá o risco de sobrestimação, ao excluir áreas que, com unidades espaciais mais amplas, seriam indevidamente incluídas na análise.

Em suma, a hipótese será considerada válida caso a percentagem de edifícios localizados em subsecções com vulnerabilidade elevada seja igual ou superior a 50%. Caso contrário, os resultados permitirão refutar a afirmação inicial, contribuindo para uma avaliação mais fundamentada do risco sísmico na cidade de Lisboa.

2. Na eventual ocorrência de um sismo em Lisboa, as infraestruturas de socorro, nomeadamente os hospitais e centros de saúde, ficam inoperáveis e instaura-se o caos;

A Hipótese 2 baseia-se numa outra declaração do entrevistado mencionada na hipótese anterior no qual João Paulo Costa indica: “*À exceção do Hospital da Luz, que está preparado para o sismo com a melhor tecnologia que existe, o Hospital de São José colapsa, o Hospital de Curry Cabral cai, o Hospital de Santa Maria fica inoperacional.*” (Amorim, 2023). Esta premissa será avaliada com base na localização geográfica dos hospitais e centros de saúde da cidade, cruzando os mesmos com o mapa final que representa os níveis estimados de vulnerabilidade sísmica das zonas onde se inserem.

3. Face a uma réplica do terramoto de 1755, Lisboa corre o risco de perder novamente 4-10% da sua população;

A Hipótese 3, evocada pelo representante da Proteção Civil na sua apresentação do Plano de Risco Sísmico da Cidade de Lisboa, Manuel João Ribeiro (2016), será avaliada através da identificação das áreas com elevada ou muito elevada vulnerabilidade sísmica, resultantes do modelo desenvolvido. Os dados populacionais, provenientes da BGRI de 2021 à subsecção estatística, permitirão estimar a percentagem da população potencialmente afetada, mediante a seleção espacial com base na localização das zonas de maior vulnerabilidade. O valor obtido

será comparado com o intervalo de 4% a 10% sugerido nas declarações, permitindo validar ou refutar a exatidão da hipótese.

Tal como foi indicado na Hipótese 1, o uso da subsecção estatística serve apenas para indicar um valor percentual mais próximo do real, embora não corresponda à distribuição exata da população dentro de cada zona de vulnerabilidade.

4. Na eventual ocorrência de um sismo seguido de tsunami, Lisboa enfrentaria, na atualidade, um cenário semelhante ao do terramoto de 1755.

A Hipótese 4 tem por base a afirmação de Francisco Mota de Sá à CNN Portugal, segundo a qual, após 175 dias de intervalo entre os últimos sismos, *“Com uma proximidade destas, tão pequena, isto significa um risco de destruição semelhante ao do terramoto de 1755 – mesmo que com menor magnitude.”* (Mandeiro & Palma, 2025).

Esta premissa será analisada com base na avaliação espacial dos resultados obtidos no segundo cenário modelado, que considera a ocorrência de um sismo seguido de tsunami. Para aferir se o impacto projetado se aproxima daquele registado historicamente, será realizada uma análise comparativa com documentação iconográfica da época, nomeadamente a planta topográfica da cidade de Lisboa pós-sismo de 1755, e com estudos secundários que procuraram mapear os danos históricos (Câmara Municipal de Lisboa, s.d.). Entre estes, destaca-se a dissertação de mestrado: *Desenvolvimento de um WebSIG do Tsunami de 1755 na zona ribeirinha de Lisboa* (Correia, 2019), que utiliza o registo de destruição de 32 edifícios dos quais 17 igrejas como indicador espacial do impacto do evento.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A presente secção pretende apresentar e discutir os principais resultados obtidos com a aplicação do modelo de vulnerabilidade sísmica ao concelho de Lisboa, com base nos dados espaciais recolhidos e processados. Os resultados estão estruturados em dois cenários: o primeiro simula a ocorrência de um sismo (secção 5.1) e o segundo integra, adicionalmente, o impacto de um tsunami subsequente (secção 5.2).

A análise desenvolvida permite identificar os padrões espaciais de vulnerabilidade, com especial atenção às áreas mais críticas, considerando todos os fatores incluídos no sistema - populacional, estrutural, físico e de acessibilidade a infraestruturas de socorro. Paralelamente, a comparação entre cenários (secção 5.3) possibilita a avaliação do agravamento da vulnerabilidade resultante da combinação de múltiplos perigos.

Estes resultados serão posteriormente interpretados à luz das quatro hipóteses formuladas no capítulo anterior e comparados com evidência científica presente na literatura previamente selecionada (secção 5.4).

5.1. Cenário 1 - Sismo

O primeiro cenário modelado representa a vulnerabilidade sísmica do concelho de Lisboa perante a ocorrência de um sismo, sem perigos secundários associados. O mapa gerado, apresentado na Figura 5.1, evidencia uma distribuição espacial heterogénea da vulnerabilidade, com níveis que variam entre moderado (2) e muito elevado (4), de acordo com os valores compostos obtidos a partir da integração dos cinco critérios principais: demografia, socioeconomia, ambiente construído, solos e acessibilidade (Apêndice B).

A análise espacial revela uma clara concentração de áreas com vulnerabilidade mais acentuada nas zonas orientais e ribeirinhas da cidade. Estas zonas apresentam maior densidade populacional, com uma presença significativa de idosos, mulheres e população com níveis de instrução mais baixos, como provado pela componente demográfica e socioeconómica, que registam, respetivamente, valores elevados e moderados de vulnerabilidade em várias freguesias destas áreas.

A vulnerabilidade é ainda agravada pela predominância de edifícios antigos, de materiais estruturalmente frágeis, construídos em áreas de tecido urbano contínuo e de difícil acesso. A estes fatores somam-se solos com menor estabilidade geológica e infraestruturas de emergência menos acessíveis, aspetos visíveis nas componentes de solos e acessibilidade e segurança, respetivamente.

Neste contexto, destacam-se freguesias como São Vicente, Penha de França, Beato, Misericórdia, Ajuda e Olivais (Figura 5.2). Estas zonas correspondem, em grande medida, a áreas urbanas históricas, caracterizadas pela presença de edificado com estruturas mais vulneráveis, solos com alguma instabilidade e acessos condicionados (Apêndice B), resultando numa maior exposição sísmica e menor capacidade de resposta.

Em contraste, freguesias como Parque das Nações, Lumiar, Campolide ou Benfica apresentam predominantemente valores de vulnerabilidade moderada, associados à presença de edifícios mais recentes, infraestruturas urbanisticamente mais bem planeadas, bem como menor densidade de população vulnerável, como visível através do Apêndice B.

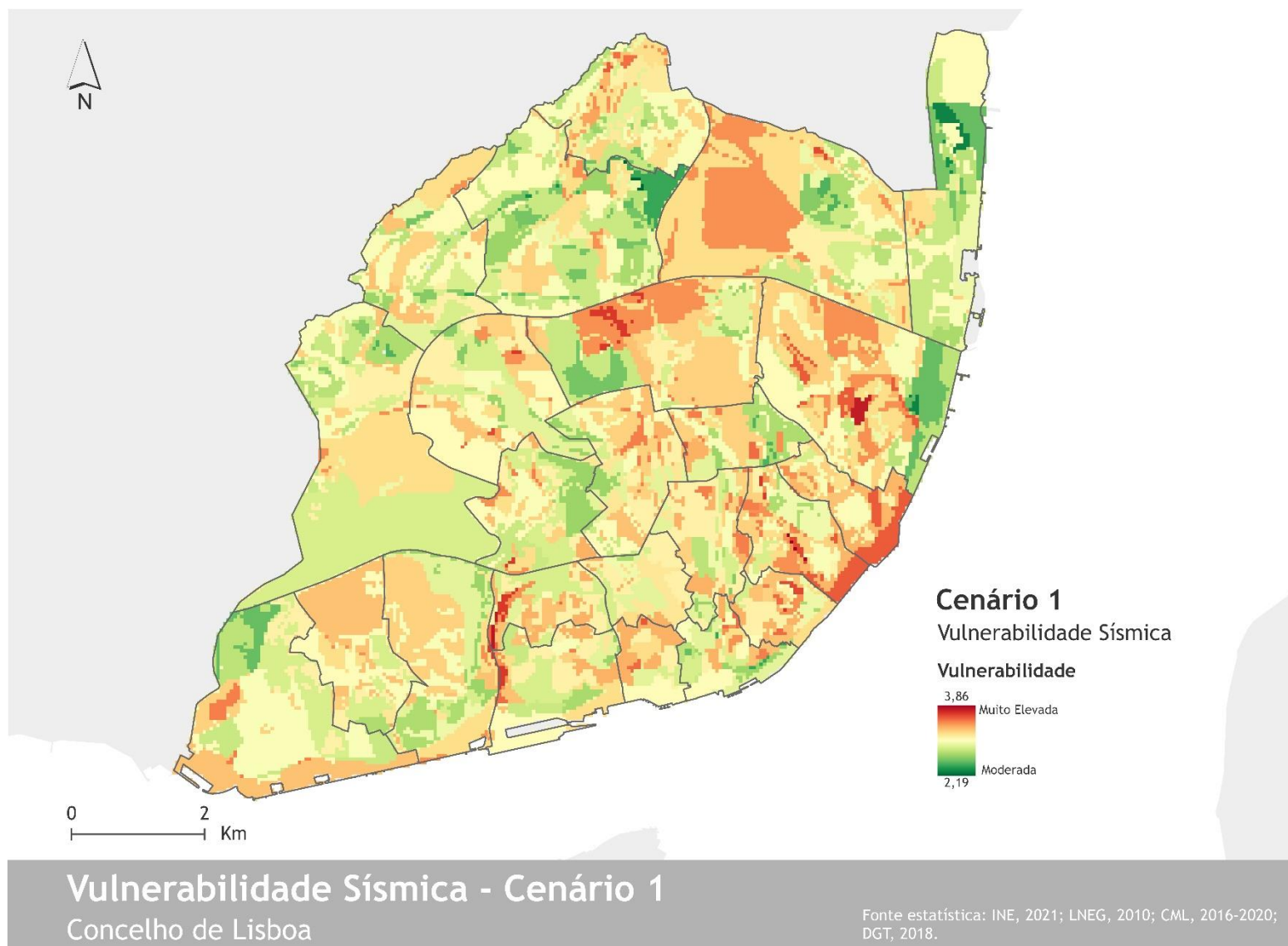


Figura 5.1 - Vulnerabilidade Sísmica do Concelho de Lisboa: Cenário 1 (Sismo)

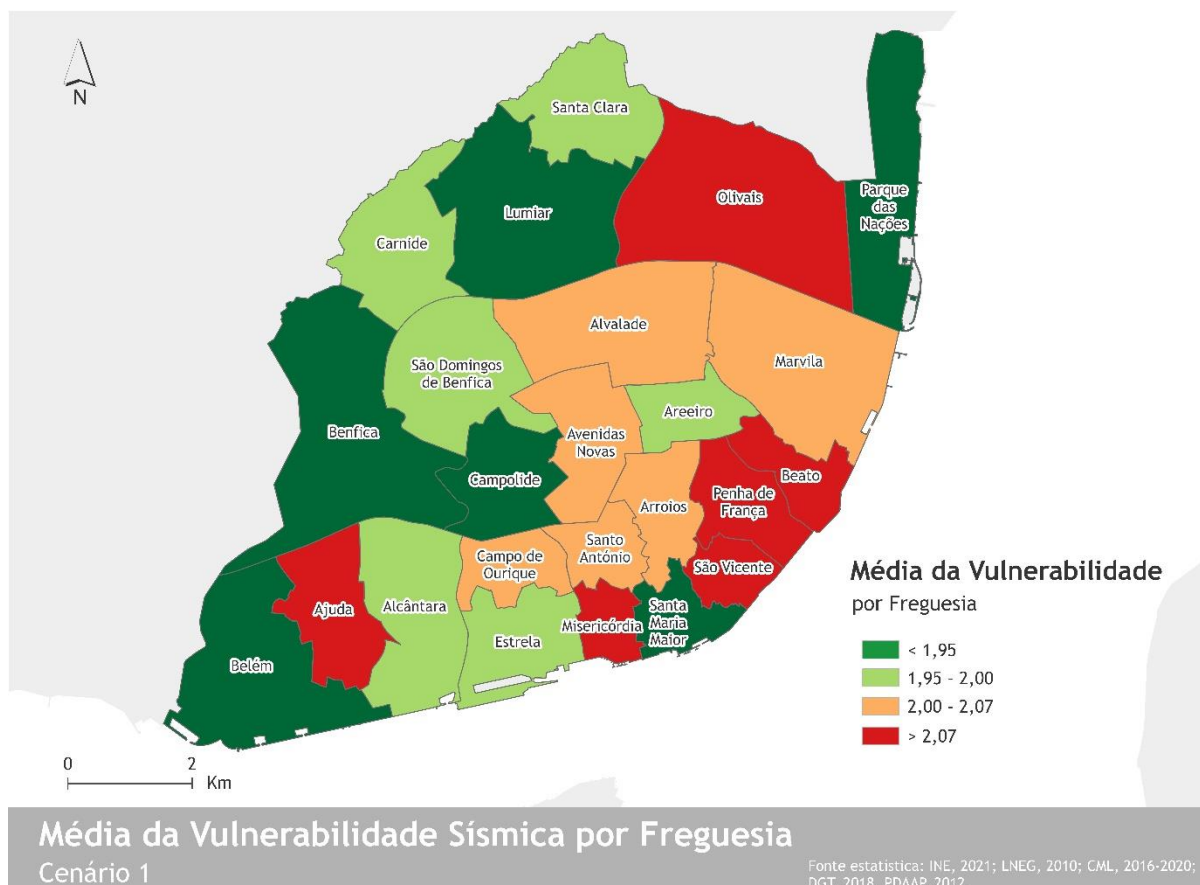


Figura 5.2 - Média da Vulnerabilidade Sísmica do Concelho de Lisboa por Freguesia: Cenário 1 (Sismo)

5.2. Cenário 2 - Sismo seguido de Tsunami

O segundo cenário modelado considera a ocorrência de um sismo seguido de um tsunami, permitindo avaliar os efeitos acumulados destes dois fenómenos sobre o concelho de Lisboa. O mapa gerado, apresentado na Figura 5.3, revela uma distribuição espacial heterogénea da vulnerabilidade, com níveis que variam entre moderado (2) e muito elevado (4). Este resulta da integração ponderada de seis critérios: as cinco componentes presentes no Critério 1 e uma componente específica relativa à exposição ao tsunami, baseada na proximidade à linha de costa e altimetria do território.

Os resultados da Figura 5.3, apoiados por os da Figura 3.4, evidenciam uma acentuada concentração de vulnerabilidade muito elevada e elevada ao longo do sul do concelho, nomeadamente na zona ribeirinha e de baixa altitude, com destaque para as freguesias de Beato, Penha de França, São Vicente, Santa Maria Maior, Misericórdia e Estrela. Estas áreas coincidem com zonas que, para além de

apresentarem elevados níveis de vulnerabilidade nos critérios de solos e acessibilidade, e níveis moderados na componente estrutural, registam também uma elevada suscetibilidade ao impacto de um tsunami, conforme ilustrado no Apêndice B.

Contrariamente, freguesias a norte e noroeste do concelho, como Santa Clara, Lumiar, Carnide e Benfica apresentam, na sua maioria, valores de vulnerabilidade moderada, resultantes da combinação de fatores favoráveis como: construções mais recentes, condições geológicas relativamente mais estáveis e menor exposição direta ao impacto de um eventual tsunami, devido à sua localização em cotas mais elevadas e afastadas da linha de costa.

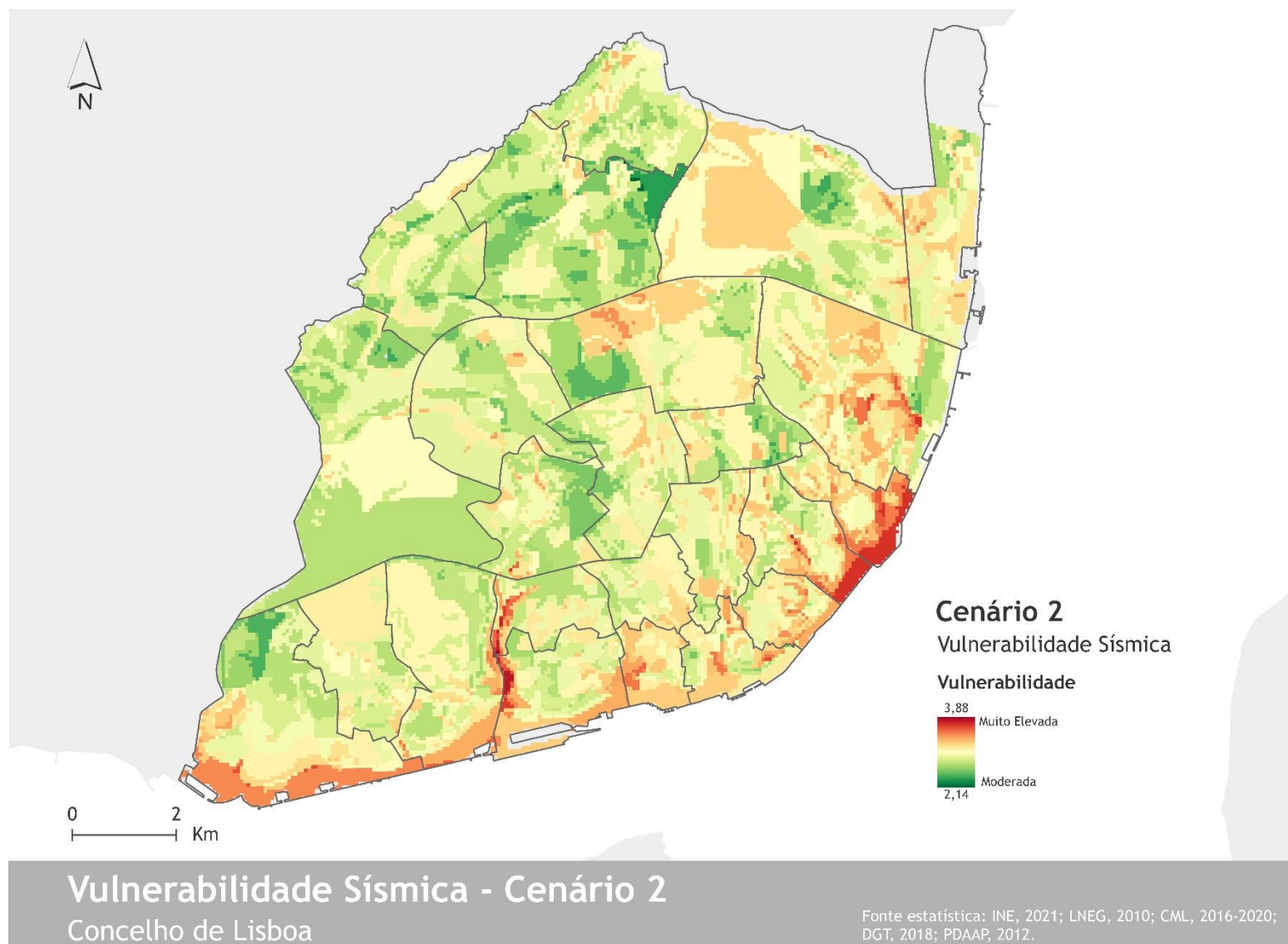


Figura 5.3 - Vulnerabilidade Sísmica do Concelho de Lisboa: Cenário 2 (Sismos seguido de Tsunami)

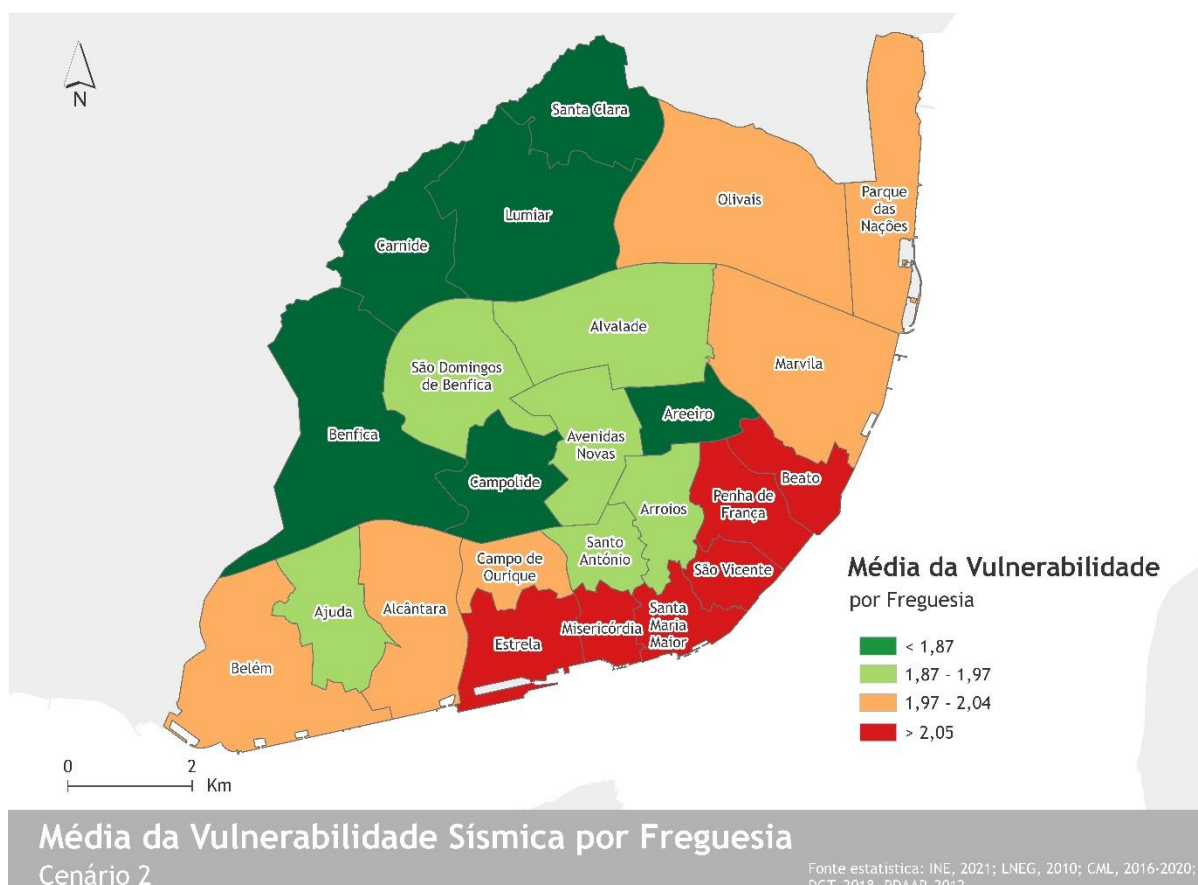


Figura 5.4 - Média da Vulnerabilidade Sísmica do Concelho de Lisboa por Freguesia: Cenário 2 (Sismo seguido de Tsunami)

5.3. Comparação entre cenários

A análise comparativa entre os dois cenários permite evidenciar os efeitos adicionais decorrentes da integração do impacto de um tsunami subsequente de um sismo. À primeira vista, a leitura visual dos mapas lado a lado pode dar a perceção de que, no cenário composto (sismo seguido de tsunami), a vulnerabilidade global parece menos acentuada em determinadas zonas centrais e norte da cidade, sugerindo uma possível melhoria. No entanto, esta requer uma interpretação crítica.

A incorporação da componente tsunami no segundo cenário introduz uma redistribuição espacial da vulnerabilidade: o agravamento significativo das zonas ribeirinhas e de baixa altitude, sobretudo no sul e este do concelho, faz com que estas áreas passem a concentrar os níveis mais elevados de exposição. Este efeito resulta numa suavização relativa das áreas que, no primeiro cenário, apresentavam vulnerabilidade elevada, particularmente em zonas como é o caso de Olivais, Alvalade e Santa Clara, agora classificadas com níveis ligeiramente inferiores. Esta

alteração não decorre de uma melhoria real das condições, mas sim de um reajuste proporcional induzido pela redistribuição dos pesos com a introdução de um novo fator de risco.

Assim, enquanto o cenário 1 destaca áreas críticas dispersas por grande parte do concelho, o cenário 2 restringe a concentração de vulnerabilidade muito elevada às zonas ribeirinhas, evidenciando como a sobreposição de múltiplos perigos naturais, neste caso, um sismo e um tsunami, pode modificar significativamente os padrões espaciais de vulnerabilidade. Esta comparação permite, por isso, compreender como determinados territórios passam a ser prioritários em função do tipo de ameaça considerada, e como áreas anteriormente classificadas com vulnerabilidade elevada podem ser relativizadas pela emergência de áreas ainda mais expostas.

Importa ainda referir que ambos os cenários partilham características comuns, como o facto de a vulnerabilidade ser expressa numa escala contínua entre moderado (2) e muito elevado (4). Independentemente do cenário considerado, a totalidade do concelho de Lisboa apresenta, no mínimo, níveis moderados de vulnerabilidade, o que evidencia uma exposição generalizada ao risco sísmico e reforça a necessidade de medidas de prevenção e reconstrução aplicáveis a todo o território, ainda que com diferentes graus de prioridade.

Em ambos os casos, observa-se uma distribuição espacial heterogénea, com padrões de vulnerabilidade distintos entre freguesias, e a persistência de áreas críticas, como Misericórdia, São Vicente, Beato e Penha de França, que se mantêm entre as mais vulneráveis. Este facto reflete a continuidade de condições adversas, independentemente da combinação de fatores considerada.

Esta leitura reforça a importância de adotar metodologia de risco individualizado, mas também de múltiplos riscos no planeamento urbano e na definição de estratégias de mitigação do risco, reconhecendo que a vulnerabilidade não é estática nem absoluta, mas sim sensível à natureza e combinação dos perigos modelados (Bathrellos et al., 2017, p. 120; Skilodimou et al., 2019, p. 47; Xofi et al., 2024, p. 242).

5.4. Validação das Hipóteses

Refutar hipóteses pré-estabelecidas é um passo fundamental na análise crítica, pois evita a confirmação de ideias preconcebidas e assegura que as conclusões se baseiam em evidência. Embora esta dissertação seja conduzida individualmente, o modelo desenvolvido funciona como uma ferramenta que permite avaliar a validade de cada hipótese com base em dados espaciais e critérios previamente definidos. Clark (2013, p. 51) salienta precisamente a importância de adotar um olhar crítico sobre a informação, de forma a evitar interpretações enviesadas e garantir que as conclusões resultam de uma análise fundamentada. Neste sentido, cada uma das hipóteses foi analisada individualmente.

5.4.1. Hipótese 1

O modelo desenvolvido para testar a Hipótese 1 – “Na eventual ocorrência de um sismo em Lisboa, metade dos prédios em colapso” –, cujo resultado é apresentado na Figura 5.5 e cujos procedimentos metodológicos e pesos são apresentados e descritos na secção 4.2 e no Apêndice C e **Anexo E**, permitiu estimar a proporção de edifícios situados em áreas com vulnerabilidade estrutural elevada.

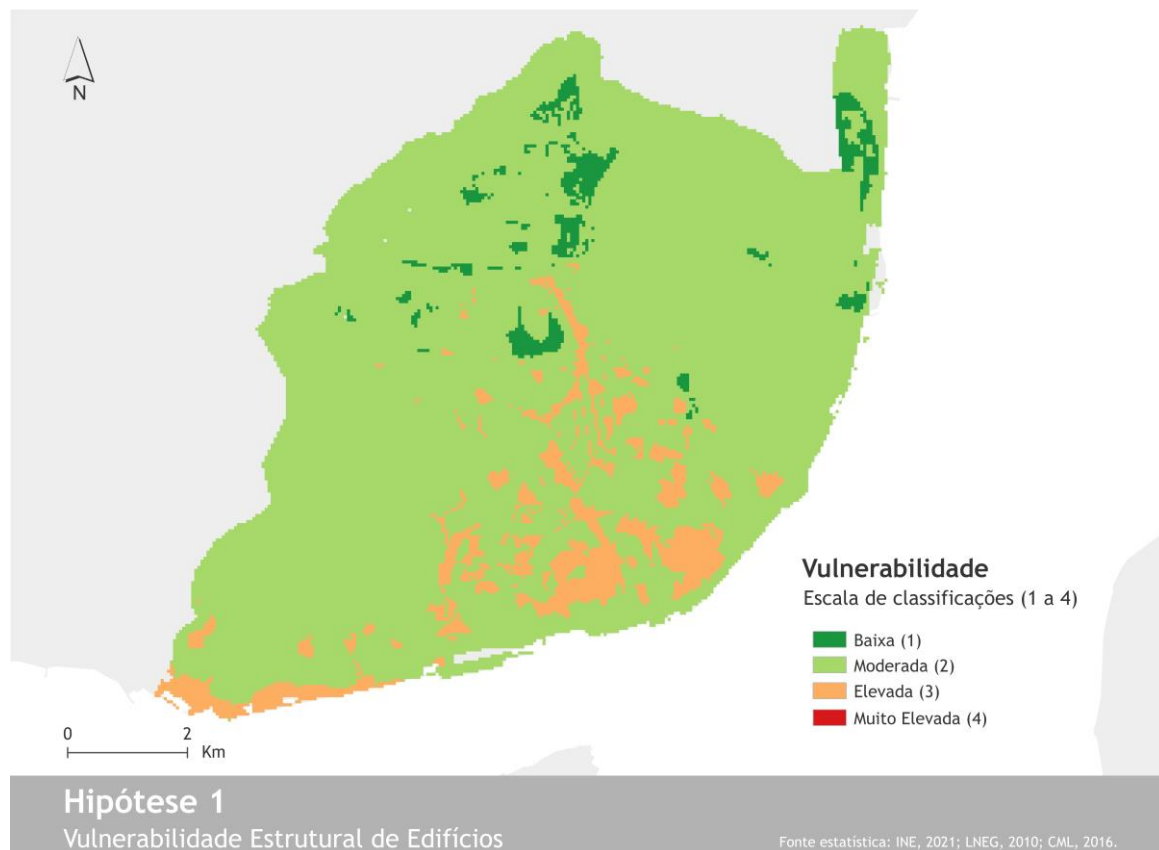


Figura 5.5 - Vulnerabilidade Estrutural de Edifícios do Concelho de Lisboa

Com base na sobreposição das subsecções estatísticas da BGRI de 2021 às zonas classificadas com nível 3 de vulnerabilidade, contabilizaram-se 19 294 edifícios nestas áreas. Dado o total de 49 223 edifícios existentes no concelho, a percentagem estimada de construções potencialmente suscetíveis ao colapso é de aproximadamente 39,2%, tal como é possível visualizar a partir da fórmula (4).

$$\% \text{ de edifícios suscetíveis ao colapso} = \frac{19\,294}{49\,223} \times 100 = 39,2\% \quad (4)$$

Este valor revela que, embora exista uma parcela significativa de edifícios em zonas de risco estrutural elevado, os resultados obtidos refutam a hipótese declarada por José Paulo Costa ao *Diário de Notícias* (Amorim, 2023), ao indicarem uma vulnerabilidade potencial inferior a 50%. Na verdade, a proporção estimada - ligeiramente abaixo dos 39,2% - poderá ainda representar uma sobrestimação, uma vez que considera o total de edifícios da subsecção estatística, e não apenas aqueles efetivamente inseridos nas zonas de vulnerabilidade elevada. Esta limitação evidencia a dificuldade de obtenção de dados mais precisos, reconhecida na literatura (Peduzzi et al., 2005, p. 267; Rashed & Weeks, 2003, p. 548). Ainda assim, a utilização da subsecção estatística da BGRI permite uma aproximação mais realista do fenómeno, quando comparada com unidades espaciais como a secção estatística, cujo uso resultaria numa estimativa de 57,6%.

5.4.2. Hipótese 2

Com o objetivo de avaliar a Hipótese 2 – “Na eventual ocorrência de um sismo em Lisboa, as infraestruturas de socorro, nomeadamente os hospitais e centros de saúde, ficam inoperáveis e instaura-se o caos” –, foi realizada uma análise espacial da localização dos hospitais e centros de saúde de Lisboa face ao mapa final de vulnerabilidade sísmica (Figura 5.6), para responder a esta segunda hipótese.

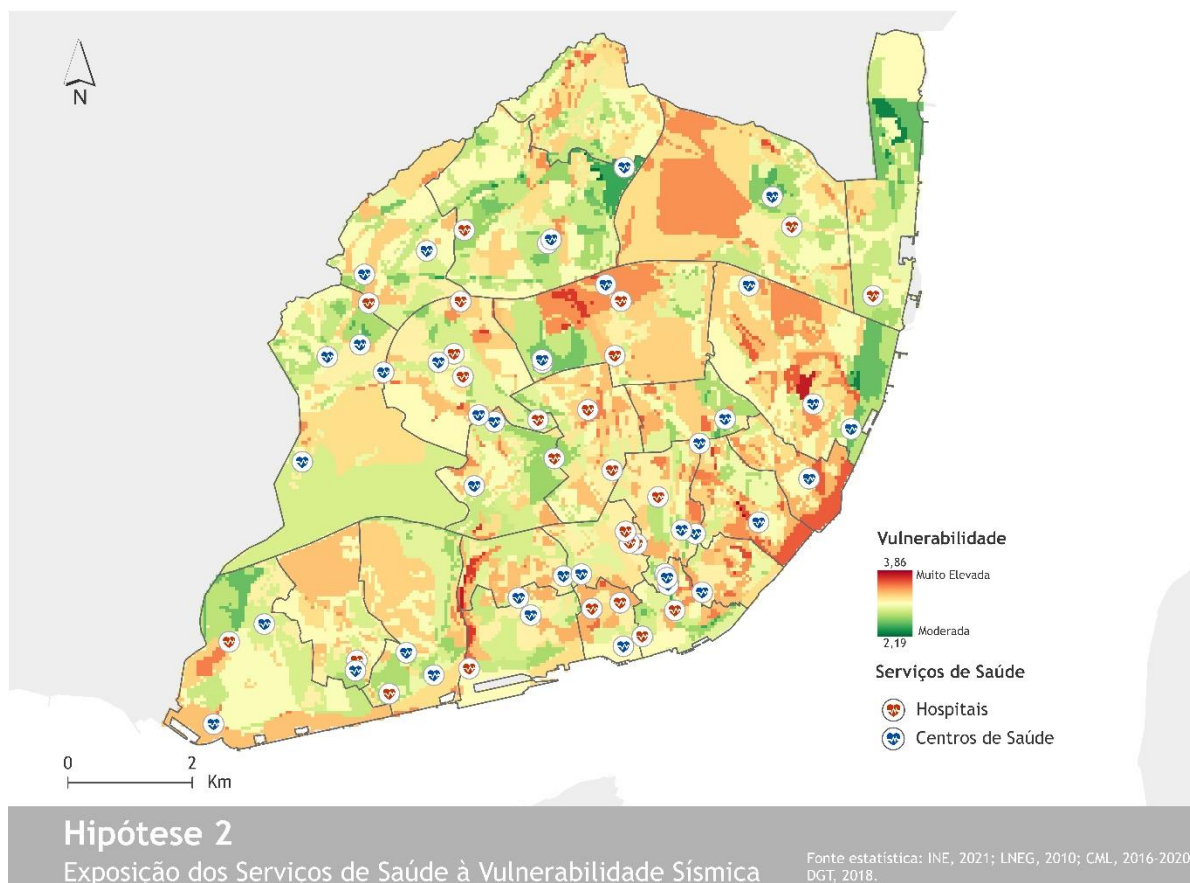


Figura 5.6 - Exposição dos Serviços de Saúde à Vulnerabilidade Sísmica do Concelho de Lisboa

Com base no resultado, verifica-se que apenas duas unidades hospitalares — o Hospital Curry Cabral, nas Avenidas Novas, e o Hospital Júlio de Matos, em Alvalade — se encontram em zonas classificadas com vulnerabilidade sísmica muito elevada, sendo, por isso, as únicas infraestruturas para as quais o risco de colapso poderá ser considerado mais plausível. Para além destes, destaca-se também unidades de saúde elementares em Marvila e Alvalade, todas situadas em zonas avermelhadas do modelo, o que aponta para uma maior exposição ao risco.

Entre os hospitais referidos na declaração de José Paulo Costa (Amorim, 2023), o Hospital de São José, na freguesia de Santo António, e unidades adjacentes como o Hospital dos Capuchos e Santa Marta encontram-se em zonas de vulnerabilidade moderada a elevada, sugerindo um risco relevante, embora inferior ao colapso total. O Hospital de Santa Maria, situado na freguesia de Alvalade, por sua vez, está localizado numa área de vulnerabilidade moderada, o que não compromete diretamente a sua estrutura, mas poderá torná-lo mais suscetível a sobrecargas funcionais caso outras unidades fiquem inoperacionais. Já o Hospital da Luz, em São

Domingos de Benfica, apontado como exemplo da preparação estrutural avançada, encontra-se numa zona de vulnerabilidade moderada a ligeiramente elevada, o que não contraria a afirmação, embora o modelo não integre dados específicos sobre reforços estruturais.

Ainda assim, destaca-se a pertinência da preocupação expressa pelo autor, uma vez que cerca de 57% dos hospitais e 45% dos centros de saúde de Lisboa se localizam em áreas de vulnerabilidade sísmica médio-alta a elevada (tons entre o amarelado e o avermelhado). Esta distribuição revela que uma parcela significativa das infraestruturas de socorro da cidade está exposta a um grau de risco considerável, que poderá comprometer a sua funcionalidade, mesmo que não resulte no seu colapso.

Assim, a hipótese é refutada, já que o modelo não valida a inoperacionalidade generalizada das unidades referidas. No entanto, os dados obtidos reforçam a necessidade de considerar a vulnerabilidade do sistema de saúde no planeamento da resposta sísmica. A identificação de unidades potencialmente mais frágeis deve ser acompanhada de estratégias de reforço estrutural, bem como da previsão de infraestruturas alternativas, como hospitais de campanha, capazes de responder rapidamente em cenários mais graves.

5.4.3. Hipótese 3

Com base na seleção espacial entre o modelo de vulnerabilidade sísmica e os dados da BGRI à subsecção estatística, estimou-se que aproximadamente 3,9% da população do concelho de Lisboa reside em áreas classificadas com vulnerabilidade sísmica elevada ou muito elevada, tal como se demonstra na Figura 5.7 e na fórmula (5).

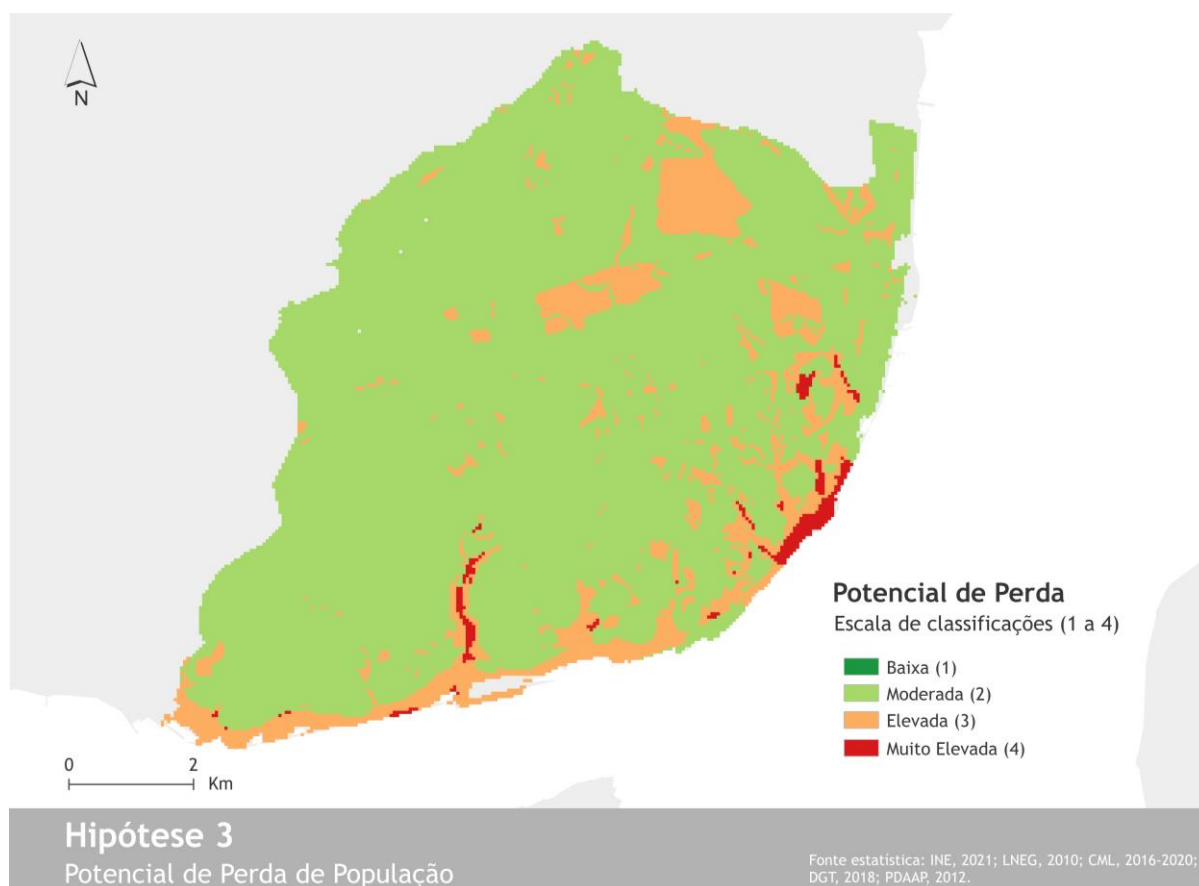


Figura 5.7 - Potencial de Perda de População do Concelho de Lisboa

$$\% \text{ de perda de população} = \frac{21\,603}{547\,733} \times 100 = 3,9\% \quad (5)$$

Este valor, por efeitos de arredondamento, aproxima-se do limite inferior do intervalo proposto na Hipótese 3 – “Face a uma réplica do terramoto de 1755, Lisboa corre o risco de perder novamente 4-10% da sua população” (Ribeiro, 2016). No entanto, é importante salientar que este resultado ainda representa uma ligeira sobrestimação, uma vez que considera a totalidade da população residente na subsecção como estando exposta ao risco, o que poderá não corresponder à distribuição real. Assim, pode-se afirmar que o valor possível será inferior a 4%, conduzindo à refutação da hipótese.

Apesar disso, o resultado obtido deve ser interpretado com cautela. É de destacar que, mais de dois séculos após o sismo de 1755, e apesar dos avanços estruturais e tecnológicos significativos, a redução do risco estimado sobre a população releva-se ligeira. Este dado expõe um paradoxo: por um lado, os edifícios atuais tendem a ser

mais resistentes; por outro, a progressiva artificialização do território urbano introduz novas formas de vulnerabilidade.

Assim, embora a hipótese seja refutada em termos percentuais, a preocupação expressa na sua formulação não deve ser desvalorizada. Os resultados reforçam a necessidade de se adotarem estratégias de mitigação de risco que permitam minimizar o impacto de futuros danos sísmicos sobre a população.

5.4.4. Hipótese 4

A avaliação da Hipótese 4 — “Na eventual ocorrência de um sismo seguido de tsunami, Lisboa enfrentaria, na atualidade, um cenário semelhante ao do terramoto de 1755” — baseou-se na análise comparativa entre o modelo desenvolvido para o Cenário 2 e os registos disponíveis sobre o impacto do terramoto de 1755. Apesar das limitações inerentes à comparação entre dados modelados e a informação histórica fragmentada, foram identificadas algumas coincidências espaciais relevantes.

O cruzamento visual entre o mapa da Figura 5.3 e o *WebSIG do Tsunami de 1755 na zona ribeirinha de Lisboa* (Figuras 5.8 e 5.9) (<https://arcg.is/1bTXa0>), desenvolvido por Correia (2019), revela uma concentração de áreas classificadas com vulnerabilidade moderada e elevada - tons alaranjados e avermelhados - ao longo das zonas ribeirinhas da cidade, nomeadamente nas atuais freguesias de Santa Maria Maior, Misericórdia e Estrela. Esta distribuição coincide, em parte, com os locais identificados no WebSIG como tendo sofrido colapsos parciais ou totais.

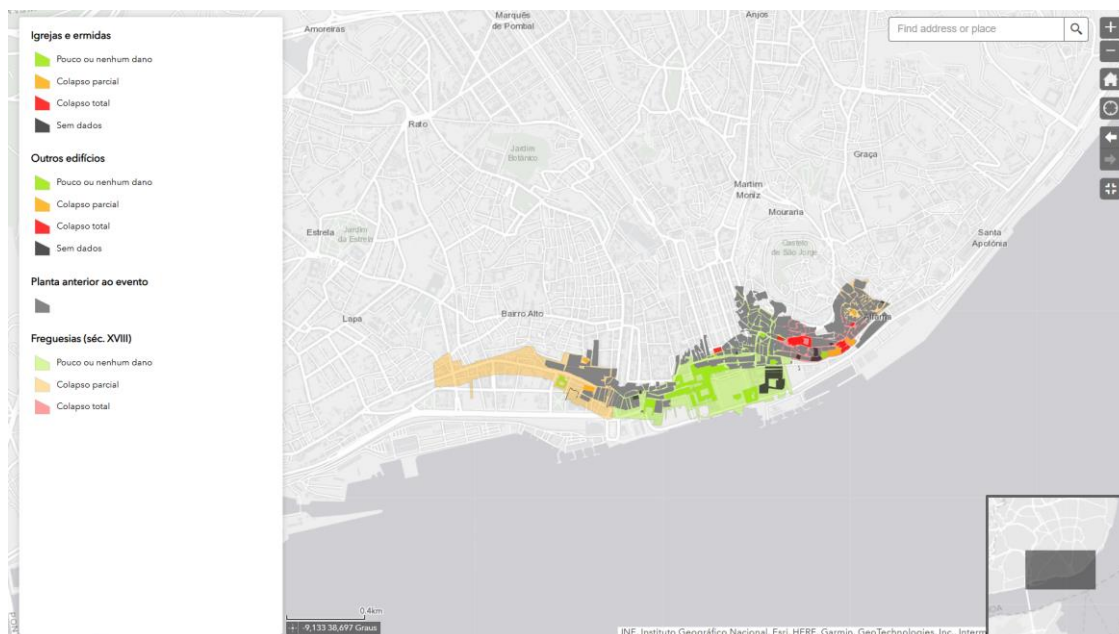


Figura 5.8 - Resultado do WebSIG do Tsunami de 1755 na zona ribeirinha de Lisboa: Impacto do Sismo

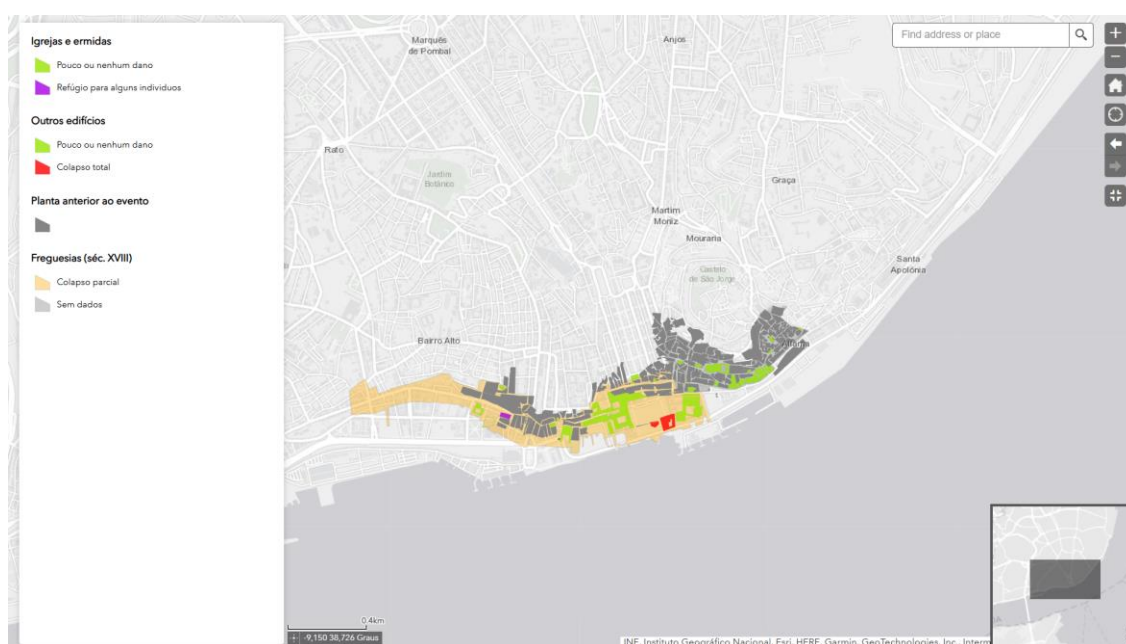


Figura 5.9 - Resultado do WebSIG do Tsunami de 1755 na zona ribeirinha de Lisboa: Impacto do Tsunami

Adicionalmente, a análise da planta topográfica da cidade pós-terramoto (Anexo F), que representa graficamente os danos ocorridos na época, reforça o padrão de destruição concentrado na baixa da cidade e na frente ribeirinha, o que corrobora os resultados observados na modelação atual.

Contudo, importa reconhecer que o WebSIG de 1755 foca-se apenas numa pequena área do concelho e carece de dados para outras zonas da cidade, o que limita a comparação com o modelo atual. Tal como no caso da planta topográfica, a falta de documentação relativa a outras áreas urbanas torna impossível extrapolar o impacto de forma precisa para todo o território de Lisboa.

Deste forma, conclui-se que, embora exista uma conformidade parcial entre as zonas identificadas como altamente vulneráveis no presente e os locais severamente afetados em 1755, não é possível confirmar nem refutar plenamente a hipótese de que Lisboa enfrentaria atualmente um cenário de destruição semelhante ao do sismo histórico.

A escassez de fontes oficiais e registos espaciais detalhados sobre o impacto do terramoto de 1755 evidencia um vazio de informação que, passados quase 270 anos, ainda não foi colmatado. Esta lacuna não só dificulta a reconstituição do passado, como também levanta preocupações sobre a preparação da cidade para eventos extremos semelhantes no futuro. Apesar dos avanços científicos e tecnológicos, Lisboa continua sem um mapeamento dos efeitos daquele que é considerado o maior desastre sísmico da sua história.

5.5. Síntese de Resultados

A presente secção apresenta uma sistematização final dos resultados obtidos ao longo do estudo. A Tabela 5.1 sintetiza os dois cenários modelados de vulnerabilidade sísmica no concelho de Lisboa, indicando os objetivos, critérios considerados e os principais resultados associados. Por sua vez, a Tabela 5.2 cruza cada hipótese de investigação com o respetivo cenário e critérios, evidenciando os resultados obtidos e a sua validade com base no modelo desenvolvido.

Tabela 5.1 - Síntese de Resultados: Cenários de Vulnerabilidade

Cenários	Objetivo	Critérios Considerados	Resultados
Cenário 1	Avaliar a vulnerabilidade sísmica do Concelho de Lisboa	Demográfico, Socioeconómico, Ambiente Construído, Solos e Acessibilidade e Segurança	Vulnerabilidade sísmica em geral moderada, com níveis mais elevados nas zonas orientais e ribeirinhas, resultantes da combinação de fatores demográficos, socioeconómicos, estruturais, geológicos e de acessibilidade.
Cenário 2	Avaliar o impacto de um sismo seguido de tsunami na capital portuguesa	Demográfico, Socioeconómico, Ambiente Construído, Solos, Acessibilidade e Segurança e Tsunami	Vulnerabilidade sísmica de nível moderado a muito elevado, com maior incidência nas zonas ribeirinhas, resultante da conjugação dos fatores sísmicos com a exposição ao tsunami, determinada pela baixa altitude e proximidade à linha de costa.

Tabela 5.2 - Síntese de Resultados: Hipóteses

Hipótese	Cenário	Critérios Considerados	Resultados	Validade
1. Na eventual ocorrência de um sismo em Lisboa, metade dos prédios colapsa.	1	Ambiente Construído e Solos	39,2% dos edifícios do Concelho de Lisboa são potencialmente suscetíveis ao colapso.	Refutada
2. Na eventual ocorrência de um sismo em Lisboa, as infraestruturas de socorro, nomeadamente os hospitais e centros de saúde, ficam inoperáveis e instaura-se o caos”	1	Demográfico, Socioeconómico, Ambiente Construído, Solos e Acessibilidade e Segurança	Cerca de 57% dos hospitais e 45% dos centros de saúde localizam-se em áreas com vulnerabilidade sísmica classificada como médio-alta a elevada, e não em zonas de vulnerabilidade muito elevada. Assim, embora estejam expostos a um risco considerável, este não é suficiente para apontar para uma inoperacionalidade das infraestruturas de socorro.	Refutada
3. Face a uma réplica do terramoto de 1755, Lisboa corre o risco de perder novamente 4-10% da sua população	2	Demográfico, Socioeconómico, Ambiente Construído, Solos, Acessibilidade e Segurança e Tsunami	Cerca de 3,9% da população do concelho de Lisboa reside em áreas classificadas com vulnerabilidade sísmica elevada ou muito elevada, o que indica uma maior exposição ao risco e, consequentemente, uma maior probabilidade de perda em caso de sismo	Refutada
4. Na eventual ocorrência de um sismo seguido de tsunami, Lisboa enfrentaria, na atualidade, um cenário semelhante ao do terramoto de 1755	2	Demográfico, Socioeconómico, Ambiente Construído, Solos, Acessibilidade e Segurança e Tsunami	Verifica-se uma conformidade espacial parcial entre as zonas de vulnerabilidade moderada a elevada do modelo atual e a área ribeirinha de Lisboa mais afetadas pelo terramoto e tsunami de 1755. Contudo, a limitação dos registos históricos e a escassez de dados detalhados impedem a extrapolação para todo o território, comprometendo a validação definitiva.	Inconclusiva

6. CONCLUSÕES E INVESTIGAÇÃO FUTURA

O desenvolvimento deste estudo permitiu reconhecer a vulnerabilidade como um fenómeno complexo e de natureza multicritério, que não permite obter respostas absolutas, mas sim construir uma ferramenta capaz de tornar visíveis as fragilidades de um território e, por consequência, a forma como este é estruturado e gerido. Facto que resulta da diversidade de métodos existentes, da indefinição de conceitos comuns e da multiplicidade de *stakeholders* envolvidos, cada um com perspetivas, prioridades e interpretações distintas.

No contexto da vulnerabilidade sísmica em particular, a aplicação prática do modelo evidenciou que a integração de variáveis demográficas, socioeconómicas, estruturais, físicas e de acessibilidade fornece uma visão mais completa da realidade. Neste processo, as TIG, com destaque para os SIG, revelaram-se cruciais, não apenas pela sua capacidade técnica de análise, mas também pelo seu potencial de tornar a vulnerabilidade mais tangível e compreensível, tanto para quem o gere como para quem nele reside, revelando-se funcional ao longo de todo o ciclo de gestão do risco sísmico – prevenção, monitorização, resposta rápida e reconstrução (objetivo 1). Sem este suporte tecnológico, a complexidade da vulnerabilidade sísmica dificilmente poderia ser analisada com a mesma profundidade.

Neste sentido, o contributo das TIG para este tipo de estudos ultrapassa a mera função cartográfica: permite integrar e cruzar variáveis distintas num ambiente geoespacial comum; analisar relações espaciais e identificar zonas críticas; antecipar cenários de risco; traduzir informação técnica em evidência, contribuindo também para a verificação da sua veracidade; e suportar a tomada de decisões. Estas funcionalidades respondem à pergunta de investigação: “De que forma podem as TIG ser eficazmente utilizadas no desenvolvimento de um modelo de vulnerabilidade sísmica que integre dados físicos e humanos na cidade de Lisboa?”.

No que respeita à componente prática, a aplicação do modelo ao concelho de Lisboa demonstrou que o território apresenta, em geral, uma vulnerabilidade moderada, embora com zonas de risco mais elevado. Estas concentram-se especialmente em áreas com população vulnerável, edificado antigo, solos suscetíveis à amplificação sísmica, baixa capacidade de resposta dos serviços de

emergência e proximidade ao rio. Estes resultados para além de reforçarem a importância de um planeamento urbano mais preventivo, permitem também responder diretamente aos objetivos de compreender a vulnerabilidade sísmica da cidade (objetivo 2) e de identificar padrões e tendências relevantes na sua distribuição (objetivo 3).

Complementarmente, a validação das hipóteses formuladas – embora refutadas, à exceção de uma (hipótese 4), considerada inconclusiva face às lacunas nas fontes históricas – permitiu aferir que, embora as afirmações veiculadas nos meios de comunicação social se revelem exageradas, tendo sido refutadas, contêm frequentemente um fundo de verdade (objetivo 4). Mais do que alarmar, estas mensagens procuram despertar a consciência e reflexão dos leitores. Pensar num eventual colapso de 50% dos edifícios ou numa perda populacional entre 4 e 10% pode parecer extremo, mas os valores obtidos neste estudo aproximam-se significativamente desses cenários – 39,2% e 3,9%, respetivamente –, o que reforça a importância de os considerar com seriedade. Ao traduzir o risco em evidências espaciais concretas, o modelo contribui não só para avaliar a veracidade de certas afirmações, mas também para tornar a sua comunicação mais acessível, clara e orientada para a prevenção.

Contudo, é necessário ter em conta que este modelo tem as suas limitações. A falta de dados atualizados ou suficientemente detalhados, sobretudo no que diz respeito à estrutura dos edifícios e às características do solo, condicionou a análise, exigindo adaptações. Adicionalmente, a obtenção de dados sobre outros fatores pertinentes – como a magnitude de sismos anteriores, intensidade de áreas, entre outros – revelou-se difíceis ou inacessíveis. A própria atribuição de pesos e reclassificação das variáveis, embora fundamentada, implicam sempre algum grau de subjetividade, agravado pela incerteza quanto à composição de algumas camadas de dados.

Para além das questões técnicas, este trabalho evidencia um problema de caráter cultural: o risco sísmico em Portugal, e em Lisboa em particular, continua a ser encarado de forma reativa, com medidas que tendem a surgir apenas após a ocorrência de eventos sísmicos. Apesar de os dados apontarem para uma vulnerabilidade moderada, a postura deste território continua distante de uma

cultura de prevenção. As políticas continuam reativas — surgindo essencialmente após novos terremotos —, os mecanismos de fiscalização mostram-se insuficientes — inexistindo, por exemplo, inspeção à aplicação do Eurocódigo 8 em novas construções —, e o planeamento urbano permanece, em muitos casos, desarticulado da realidade sísmica do território.

Um exemplo elucidativo desta falta de preparação é a tentativa de validação da hipótese 4, que procurou aferir a possibilidade de ocorrência de um evento semelhante ao sismo de 1755. Neste exercício, verificou-se a escassez de dados disponíveis, sendo o único documento de fonte oficial uma planta topográfica que sobrepõe os danos da época ao plano de reconstrução da cidade. Este facto revela que, apesar da pertinência histórica desta catástrofe, Lisboa não desenvolveu ainda mecanismos de prevenção para enfrentar um desastre de igual magnitude.

É também importante reconhecer que, no desastre de 1755, os danos não resultaram apenas do sismo em si, mas da junção de múltiplos fatores — sismo, incêndio, tsunami, entre outros. Este exemplo evidencia que a análise de vulnerabilidade não deve ser individualizada, pois um fenómeno pode desencadear efeitos secundários que amplificam significativamente os impactos. Embora o modelo desenvolvido nesta investigação tenha já integrado, num dos cenários, a possibilidade de ocorrência conjunta de sismo e tsunami, eventos desta magnitude demonstram a necessidade de considerar o risco de forma ainda mais abrangente. É fundamental olhar para o território como um sistema, onde as interações entre elementos naturais e humanos amplificam os impactos e exigem abordagens integradas.

Neste sentido, este modelo deverá ser expandido e aperfeiçoado no futuro. Investigações futuras poderão integrar dados com um maior nível de detalhe e novas variáveis. A colaboração multidisciplinar entre geógrafos, engenheiros, geólogos, sociólogos, entre outros decisores será essencial para refinar este tipo de modelos e garantir a sua aplicabilidade em contextos reais.

Em suma, o contributo deste trabalho não reside apenas nos mapas ou nos dados. Está, acima de tudo, na capacidade de ajudar a ver com mais clareza aquilo que

tantas vezes escolhemos ignorar e, ao fazê-lo, contribuir para que se comece a agir antes de ser tarde demais.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Amorim, R. (2023). *Metade dos prédios que existem em Lisboa não resistem a um sismo*. Diário de Notícias. <https://www.dn.pt/arquivo/diario-de-noticias/metade-dos-predios-que-existem-em-lisboa-nao-resistem-a-um-sismo-17024548.html>

Armaş, I. (2012). Multi-criteria vulnerability analysis to earthquake hazard of Bucharest, Romania. *Natural Hazards*, 63(2), 1129-1156. <https://doi.org/10.1007/s11069-012-0209-2>

Autoridade Nacional de Emergência e Proteção Civil. (2021). *Cadernos Técnicos PROCIV #28: Guia de Referência para Planeamento de Evacuação em caso de Tsunami*. Autoridade Nacional de Emergência e Proteção Civil. <https://prociv.gov.pt/pt/documentacao/caderno-tecnico-28/>

Bahishti, A. A. (2022). The Vital Role of Research Methodology in Addressing the Research Questions. *International Journal of Methodology*, 1(1), 1-1. <https://doi.org/10.21467/ijm.1.1.2016.29>

Bathrellos, G. D., Skilodimou, H. D., Chousianitis, K., Youssef, A. M., & Pradhan, B. (2017). Suitability estimation for urban development using multi-hazard assessment map. *Science of The Total Environment*, 575, 119-134. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.10.025>

Berman, L. (2015). *Haiti Earthquake Data (RASTER)* (Versão 1.1, pp. 3138506, 1915995, 11652381, 15536099, 16978537, 46277046, 6126624, 51847930, 244514, 2424734) [Dataset]. Harvard Dataverse. <https://doi.org/10.7910/DVN/ZT2DJW>

Boccardo, P., & Tonolo, F. G. (2012). Haiti Earthquake Damage Assessment: Review of the Remote Sensing Role. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XXXIX-B4, 529-532. <https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XXXIX-B4-529-2012>

Calvi, G. M., Pinho, R., Magenes, G., Bommer, J. J., Restrepo-Vélez, L. F., & Crowley, H. (2006). *Development of seismic vulnerability assessment methodologies over the past 30 years*.

Câmara Municipal de Lisboa. (s.d.). *Planta nº 2: Planta topográfica da cidade de Lisboa arruinada, também segundo o novo alinhamento dos Arquitetos Eugénio dos Santos e Carvalho e Carlos Mardel*. Arquivo Municipal de Lisboa. Obtido 13 de junho de 2025, de <https://arquivomunicipal3.cm-lisboa.pt/X-ARQWEB/Result.aspx?id=1304369&type=PCD>

Clark, R. M. (2013). Guide to the Study of Intelligence: Perspectives on Intelligence Collection. *Journal of U.S. Intelligence Studies*, 20(2), 47-53.

Contreras, D., Chamorro, A., & Wilkinson, S. (2020). Review article: The spatial dimension in the assessment of urban socio-economic vulnerability related to geohazards. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 20(6), 1663-1687. <https://doi.org/10.5194/nhess-20-1663-2020>

Corban, C., Hancilar, U., Silva, V., Ehrlich, D., & De Groeve, T. (2016). *Pan-European Seismic Risk Assessment A proof of concept using the Earthquake Loss Estimation Routine (ELER)*. LB-NA-27896-EN-C (print), LB-NA-27896-EN-N (online). <https://doi.org/10.2788/326095> (print), [10.2788/21108](https://doi.org/10.2788/21108) (online)

Correia, M. (2019). *Desenvolvimento de um WebSIG do Tsunami de 1755 na zona ribeirinha de Lisboa* [Dissertação de Mestrado, Universidade de Lisboa - Instituto de Geografia e Ordenamento do Território (IGOT)]. <http://hdl.handle.net/10451/40664>

Direção Geral do Território. (s.d). *PT-TM06/ETRS89*. Obtido 1 de junho de 2025, de <https://www.dgterritorio.gov.pt/geodesia/sistemas-referencia/portugal-continental/PT-TM06-ETRS89>

Ferreira, J. M. Q. G. (2021). Da Sismicidade à Ciência dos Sismos: Para a História da Sismologia em Portugal. *IPMA*.

Fischer, K., Häring, I., Riedel, W., Vogelbacher, G., & Hiermaier, S. (2016). Susceptibility, vulnerability, and averaged risk analysis for resilience enhancement of urban areas. *International Journal of Protective Structures*, 7(1), 45-76. <https://doi.org/10.1177/2041419615622727>

Heinzelman, J., & Waters, C. (2010). *Crowdsourcing Crisis Information in Disaster-Affected Haiti*.

Instituto Português do Mar e da Atmosfera. (2024). *Sismo de 26 de agosto de 2024 a W de Sines.* IPMA.
https://www.ipma.pt/pt/media/noticias/news.detail.jsp?y=2024&f=noticia_sismo_agosto.html

Instituto Português do Mar e da Atmosfera. (2025). *Nota Técnico-Científica Sismo 17 fevereiro.* IPMA.
https://www.ipma.pt/pt/media/noticias/news.detail.jsp?y=2025&f=Nota_tecnica_sismo_17022025_seixal_html

Jena, R., Pradhan, B., & Beydoun, G. (2020). Earthquake vulnerability assessment in Northern Sumatra province by using a multi-criteria decision-making model. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 46, 101518.
<https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2020.101518>

Kolat, C., Ulusay, R., & Suzen, M. L. (2012). Development of geotechnical microzonation model for Yenisehir (Bursa, Turkey) located at a seismically active region. *Engineering Geology*, 127, 36-53.
<https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2011.12.014>

Li, Y., Jiang, W., Zhang, J., Li, B., Yan, R., & Wang, X. (2021). Sentinel-1 SAR-Based coseismic deformation monitoring service for rapid geodetic imaging of global earthquakes. *Natural Hazards Research*, 1(1), 11-19.
<https://doi.org/10.1016/j.nhres.2020.12.001>

Mandeiro, N., & Palma, T. (2025). *Dois sismos em 175 dias é o prenúncio de que «a qualquer instante Lisboa pode sofrer uma grande chatice».* CNN Portugal.
<https://cnnportugal.iol.pt/sismo-lisboa/tremor-de-terra/dois-sismos-em-175-dias-e-o-prenuncio-de-que-a-qualquer-instante-lisboa-pode-sofrer-uma-grande-chatice/20250217/67b37894d34e3f0bae9a95f0>

Martins, V. N., e Silva, D. S., & Cabral, P. (2012). Social vulnerability assessment to seismic risk using multicriteria analysis: The case study of Vila Franca do Campo (São Miguel Island, Azores, Portugal). *Natural Hazards*, 62, 385-404.
<https://doi.org/10.1007/s11069-012-0084-x>

Nolte, M. (2010). *Earthquake risk map development using GIS and optical satellite imagery: A case study for rural areas on Java, Indonesia*. Center for Disaster Management and Risk Reduction Technology.

Nyimbili, P. H., Erden, T., & Karaman, H. (2018). Integration of GIS, AHP and TOPSIS for earthquake hazard analysis. *Natural Hazards*, 92(3), 1523-1546. <https://doi.org/10.1007/s11069-018-3262-7>

Peduzzi, P., Dao, H., & Herold, C. (2005). Mapping Disastrous Natural Hazards Using Global Datasets. *Natural Hazards*, 35(2), 265-289. <https://doi.org/10.1007/s11069-004-5703-8>

Qu, Z., Wang, F., Chen, X., Wang, X., & Zhou, Z. (2023). Rapid report of seismic damage to hospitals in the 2023 Turkey earthquake sequences. *Earthquake Research Advances*, 3(4), 100234. <https://doi.org/10.1016/j.eqrea.2023.100234>

Rashed, T., & Weeks, J. (2003). Assessing vulnerability to earthquake hazards through spatial multicriteria analysis of urban areas. *International Journal of Geographical Information Science*, 17(6), 547-576. <https://doi.org/10.1080/1365881031000114071>

Rathje, E. M., & Adams, B. J. (2008). The Role of Remote Sensing in Earthquake Science and Engineering: Opportunities and Challenges. *Earthquake Spectra*, 24(2), 471-492. <https://doi.org/10.1193/1.2923922>

Rezaie, F., & Panahi, M. (2015). GIS modeling of seismic vulnerability of residential fabrics considering geotechnical, structural, social and physical distance indicators in Tehran using multi-criteria decision-making techniques. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 15(3), 461-474. <https://doi.org/10.5194/nhess-15-461-2015>

Ribeiro, M. J. (2016). *Plano De Risco Sísmico da Cidade De Lisboa*. https://lisboaenova.org/images/stories/PontodeEncontro/2016/APRESENTACOES/P_E_01032016.pdf

Saaty, T. L., & Vargas, L. G. (2012). *Models, Methods, Concepts & Applications of the Analytic Hierarchy Process* (Vol. 175). Springer US. <https://doi.org/10.1007/978-1-4614-3597-6>

Serviço Regional de Proteção Civil e Bombeiros dos Açores. (2020). *Sismos*. SRPCBA. <https://www.prociv.azores.gov.pt/sensibilizacao/riscos/ver.php?id=5>

Simões, A., & Bento, R. (2012). *Characterization and Classification of Lisbon Old Masonry Buildings*.

Skilodimou, H. D., Bathrellos, G. D., Chousianitis, K., Youssef, A. M., & Pradhan, B. (2019). Multi-hazard assessment modeling via multi-criteria analysis and GIS: A case study. *Environmental Earth Sciences*, 78(2), 47. <https://doi.org/10.1007/s12665-018-8003-4>

Sociedade Portuguesa de Engenharia Sísmica. (2019). Risco Sísmico em Portugal. *Sociedade Portuguesa de Engenharia Sísmica*. <https://spessismica.pt/risco-sismico-em-portugal/>

SSC. (1999). *Earthquake Risk Management: A Toolkit for Decision-Makers*. California Seismic Safety Commissions. https://ssc.ca.gov/wp-content/uploads/sites/9/2020/08/ssc_1999-04_risk_toolkit.pdf

Tralli, D. M., Blom, R. G., Zlotnicki, V., Donnellan, A., & Evans, D. L. (2005). Satellite remote sensing of earthquake, volcano, flood, landslide and coastal inundation hazards. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 59(4), 185-198. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2005.02.002>

Vargas, C. A. (2023). Advanced Technology and Data Analysis of Monitoring Observations in Seismology. *Applied Sciences*, 13(19). <https://doi.org/10.3390/app131910561>

Walker, B. B., Taylor-Noonan, C., Tabbernor, A., McKinnon, T., Bal, H., Bradley, D., Schuurman, N., & Clague, J. J. (2014). A multi-criteria evaluation model of earthquake vulnerability in Victoria, British Columbia. *Natural Hazards*, 74(2), 1209-1222. <https://doi.org/10.1007/s11069-014-1240-2>

Xofi, M., Ferreira, T. M., Domingues, J. C., Santos, P. P., Pereira, S., Oliveira, S. C., Reis, E., Zêzere, J. L., Garcia, R. A. C., & Lourenço, P. B. (2024). On the Seismic Vulnerability Assessment of Urban Areas Using Census Data: The Lisbon Metropolitan

Area as a Pilot Study Area. *Journal of Earthquake Engineering*, 28(1), 242-265.
<https://doi.org/10.1080/13632469.2023.2197078>

Xu, J., Yin, X., Chen, D., An, J., & Nie, G. (2016). Multi-criteria location model of earthquake evacuation shelters to aid in urban planning. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 20, 51-62. <https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2016.10.009>

Yao, Y., Zhang, Y., Yao, T., Wong, K., Tsou, J. Y., & Zhang, Y. (2021). A GIS-Based System for Spatial-Temporal Availability Evaluation of the Open Spaces Used as Emergency Shelters: The Case of Victoria, British Columbia, Canada. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 10(2), 63.
<https://doi.org/10.3390/ijgi10020063>

APÊNDICE A: FÓRMULAS DE RECLASSIFICAÇÃO E CONVERSÃO DE VARIÁVEIS CENSITÁRIAS

$$\frac{N_INDIVIDUOS_0A14}{N_INDIVIDUOS} \times 100 \quad (6)$$

$$\frac{N_INDIVIDUOS_15A24 + N_INDIVIDUOS_25A64}{N_INDIVIDUOS} \times 100 \quad (7)$$

$$\frac{N_INDIVIDUOS_65_OU_MAIS}{N_INDIVIDUOS} \times 100 \quad (8)$$

$$\frac{N_INDIVIDUOS_H}{N_INDIVIDUOS} \times 100 \quad (9)$$

$$\frac{N_INDIVIDUOS_M}{N_INDIVIDUOS} \times 100 \quad (10)$$

$$\frac{N_ADP_1OU2_PESSOAS}{N_AGREGADOS_DOMESTICOS_PRIVADOS} \times 100 \quad (11)$$

$$\frac{N_ADP_3OU4_PESSOAS}{N_AGREGADOS_DOMESTICOS_PRIVADOS} \times 100 \quad (12)$$

$$\frac{N_ADP_5MAIS_PESSOAS}{N_AGREGADOS_DOMESTICOS_PRIVADOS} \times 100 \quad (13)$$

$$\frac{N_INDIVIDUOS}{Shape\ Area} \quad (14)$$

$$\frac{N_INDIVIDUOS_0A14 + N_INDIVIDUOS_65_OU_MAIS}{N_INDIVIDUOS} \times 100 \quad (15)$$

$$\frac{N_INDIVIDUO_ENSINCOMP_NENHUM}{N_INDIVIDUOS} \times 100 \quad (16)$$

$$\frac{N_INDIVIDUO_ENSINCOMP_1BAS + N_INDIVIDUO_ENSINCOMP_2BAS}{N_INDIVIDUOS} \times 100 \quad (17)$$

$$\frac{N_INDIVIDUO_ENSINCOMP_3BAS + N_INDIVIDUO_ENSINCOMP_SEC_E_POSSEC}{N_INDIVIDUOS} \times 100 \quad (18)$$

$$\frac{N_INDIVIDUO_ENSINCOMP_SUP}{N_INDIVIDUOS} \times 100 \quad (19)$$

$$\frac{N_INDIVIDUOS_DESEMPREGADOS_1EMP + N_INDIVIDUOS_DESEMPREGADOS_NOVOEMP}{N_INDIVIDUOS_15A24 + N_INDIVIDUOS_25A64} \times 100 \quad (20)$$

$$\frac{N_EDIFICIOS_CONSTR_ANTES_1919 + N_EDIFICIOS_CONSTR_1919A1945}{N_EDIFICIOS} \times 100 \quad (21)$$

$$\frac{N_EDIFICIOS_CONSTR_1946A1960 + N_EDIFICIOS_CONSTR_1961A1980}{N_EDIFICIOS} \times 100 \quad (22)$$

$$\frac{N_EDIFICIOS_CONSTR_1981A1990 + N_EDIFICIOS_CONSTR_1991A2000}{N_EDIFICIOS} \times 100 \quad (23)$$

$$\frac{N_EDIFICIOS_CONSTR_2001A2005 + N_EDIFICIOS_CONSTR_2006A2010}{N_EDIFICIOS} \times 100 \quad (24)$$

$$\frac{N_EDIFICIOS_CONSTR_2011A2015 + N_EDIFICIOS_CONSTR_2016A2021}{N_EDIFICIOS} \times 100 \quad (25)$$

$$\frac{N_EDIFICIOS_CONSTR_ANTES_1919 + N_EDIFICIOS_CONSTR_1919A1945}{N_EDIFICIOS} \times 100 \quad (26)$$

$$\frac{N_EDIFICIOS_1OU2_PISOS}{N_EDIFICIOS} \times 100 \quad (27)$$

$$\frac{N_EDIFICIOS_3OU4_PISOS}{N_EDIFICIOS} \times 100 \quad (28)$$

$$\frac{N_EDIFICIOS_5OU_MAIS_PISOS}{N_EDIFICIOS} \times 100 \quad (29)$$

$$\frac{N_EDIFICIOS_EXCLUS_RESIDENCIAL + N_EDIFICIOS_PRINCIPAL_RESIDENCIAL}{N_EDIFICIOS} \times 100 \quad (30)$$

$$\frac{N_EDIFICIOS_PINCIPAL_NAO_RESIDENCIAL}{N_EDIFICIOS} \times 100 \quad (31)$$

$$\frac{N_RHABITUAL_PROP_OCUP}{N_CLASSICOS_RES_HABITUAL} \times 100 \quad (32)$$

$$\frac{N_RHABITUAL_ARRENDADOS}{N_CLASSICOS_RES_HABITUAL} \times 100 \quad (33)$$

$$\frac{N_RHABITUAL_AREA_49}{N_CLASSICOS_RES_HABITUAL} \times 100 \quad (34)$$

$$\frac{N_RHABITUAL_AREA_50_99}{N_CLASSICOS_RES_HABITUAL} \times 100 \quad (35)$$

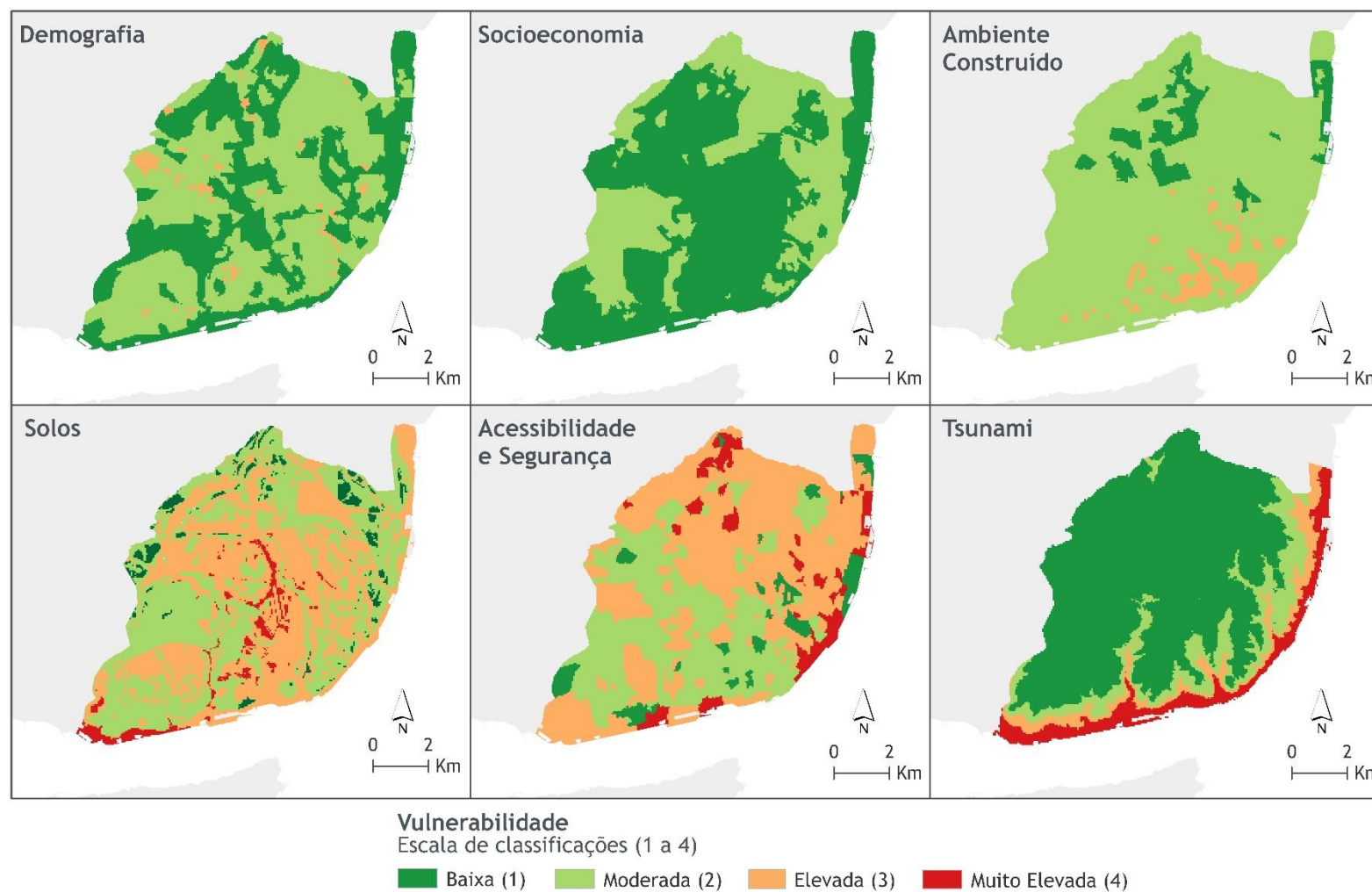
$$\frac{N_RHABITUAL_AREA_100_149}{N_CLASSICOS_RES_HABITUAL} \times 100 \quad (36)$$

$$\frac{N_RHABITUAL_AREA_150_199}{N_CLASSICOS_RES_HABITUAL} \times 100 \quad (37)$$

$$\frac{N_RHABITUAL_AREA_200MAIS}{N_CLASSICOS_RES_HABITUAL} \times 100 \quad (38)$$

$$\frac{N_EDIFICIOS}{Shape\ Area} \times 100 \quad (39)$$

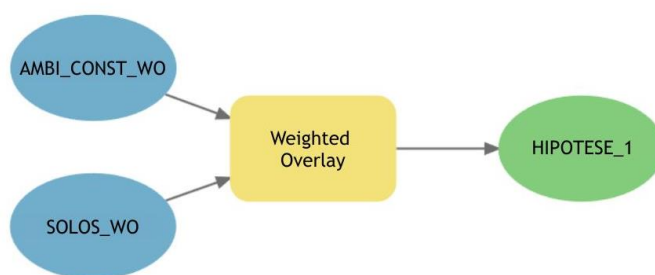
APÊNDICE B: DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DA VULNERABILIDADE POR CRITÉRIO



Vulnerabilidade por Dimensão
Concelho de Lisboa

Fonte estatística: INE, 2021; LNEG 2010; CML 2016 - 2020;
DGT, 2018; PDAAP, 2012.

APÊNDICE C: PROCEDIMENTO METODOLÓGICO DA HIPÓTESE 1



ANEXO A: FONTES E ACESSOS AOS DADOS DO ESTUDO

Fonte/ Plataforma	Base de Dados	Hiperligações
Instituto Nacional de Estatística (INE)	Base Geográfica de Referenciação de Informação (BGRI)	https://mapas.ine.pt/download/index2021Seccoes.phtml
Laboratório Nacional de Energia e Geologia (LNEG)	Carta Geológica de Portugal	https://geoportal.lneg.pt/pt/dados_abertos/cartografia_geologica/cgp1m/
Direção Geral do Território (DGT)	Carta de Uso e Ocupação do Solo	https://www.dgterritorio.gov.pt/Carta-de-Uso-e-Ocupacao-do-Solo-para-2018
Geodados Câmara Municipal de Lisboa (CML)	Carta Tipos Solos	https://geodados-cml.hub.arcgis.com/datasets/5bdfd983be0c46f1b96be1c7bb740691_0/explore
	POISocorro	https://geodados-cml.hub.arcgis.com/maps/b1ef8d7db6204ca2b508f57fc0b1fe58/about
	POISaude	https://geodados-cml.hub.arcgis.com/maps/172678f193144512860a397fde991361/about
	Mob_declives	https://geodados-cml.hub.arcgis.com/datasets/a557c10e19a44f0e9592c7b63bae8d3b_0/explore
	Ambiente DMEVAE	https://geodados-cml.hub.arcgis.com/maps/202d0f1a7f234e449761af8af14436d6/about
Portal de Dados Abertos da Administração Pública	MDT Lisboa	https://dados.gov.pt/pt/datasets/modelo-digital-de-terreno/

ANEXO B: ATRIBUIÇÃO DOS PESOS DE NÍVEL 3

(Martins, 2012) (Rezai & Panahi, 2015) (Rezai & Panahi, 2015) _N Média Média_N Peso							
Demografia	Estrutura Etária						
	População Residente <14 anos de idade (%)	0,4545	0,1999	0,5	0,4773	0,4565	46
	População residente entre os 15 e 64 anos de idade (%)	0,0909	-	-	0,0909	0,087	9
	População residente >65 anos de idade (%)	0,4545	0,1999	0,5	0,4773	0,4565	46
	Total	1	0,3998	1	1,05	1	100

(Martins, 2012) Média Peso			
Demografia	Gênero		
	População masculina residente (%)	0,289	29
	População feminina residente (%)	0,711	71
	Total	1	100

(Martins, 2012) Peso		
Demografia	Estrutura Familiar	
	Agregados familiares com 1 ou 2 pessoas (%)	43
	Agregados familiares com 3 ou 4 pessoas (%)	14
	Agregados familiares com 5 ou mais pessoas (%)	43
	Total	100

(Martins, 2012) (Rezai & Panahi, 2015) (Martins, 2012)_N (Rezai & Panahi, 2015) _N Média Peso							
Demografia	Densidade Populacional						
	Densidade Populacional	0,2845	0,3022	1	1	1	100
	Total	0,2845	0,3022	1	1	1	100

(Martins, 2012) (Walker et al., 2014) (Martins, 2012)_N (Walker et al., 2014)_N Média Peso							
Socioeconomia	Índice de Dependência Social						
	Índice de Dependência Social	0,2085	-0,1528	1	1	1	100
	Total	0,2085	-0,1528	1	1	1	100

(Martins, 2012) (Martins, 2012)_N Peso				
Socioeconomia	Taxa de Analfabetismo			
	Índice de Dependência Social	0,4874	1	100
	Total	0,4874	1	100

(Martins, 2012) Peso			
Demografia	Nível de Educação		
	Indivíduos que concluíram o 1º e 2º ciclos de escolaridade (%)	0,637	64
	Indivíduos que concluíram o 3º ciclo de escolaridade ou ensino secundário(%)	0,2583	26
	Indivíduos que concluíram o ensino superior (%)	0,1047	10
	Total	1	100

	(Martins, 2012)	(Walker et al., 2014)	(Rezai & Panahi, 2015)	(Martins, 2012)_N	(Walker et al., 2014)_N	(Rezai & Panahi, 2015)_N	Média	Peso
Socioeconomia	Taxa de Desemprego							
	Taxa de Desemprego	0,2085	-0,0412	0,0733	1	1	1	100
	Total	0,2085	-0,0412	0,0733	1	1	1	100

(Martins, 2012)					(Martins, 2012)_N					Peso				
Ambiente Construído	Ano de Construção													
	Construções construídas antes de 1919 até 1945 (%)		0,637		0,6103				61					
	Construções construídas entre 1946 e 1985 (%)		0,2583		0,2475				25					
	Construções construídas entre 1986 e 2000 (%)		0,1047		0,1003				10					
	Construções construídas entre 2001 e 2010 (%)		0,0332 ¹		0,0318				3					
	Construções construídas entre 2011 e 2021 (%)		0,0106 ²		0,0102				1					
	Total		1,04		1				100					

¹ $\text{Peso} = [(P46_85 - P86_00)] - [(P<45-P46_85) - 0,1536] - P46_85$

² $\text{Peso} = [(P86_00-P01_10)] - [(P46_85-P86_00) - 0,0332] - P86_00$

		(Martins, 2012)	(Martins, 2012)_N	Peso
Ambiente Construído	Estrutura do Edificado			
	Edifícios construídos em adobe, tijolo de terra e estruturas de alvenaria de pedra (%)	0,637	0,6165	62
	Edifícios construídos com estruturas de alvenaria (%)	0,2583	0,25	25
	Edifícios construídos com estruturas de betão armado (%)	0,1047	0,1013	10

(Martins, 2012) (Martins, 2012)_N Peso				
Ambiente Construído	Estrutura do Edificado (continuação)			
	Edifícios construídos com estruturas de betão armado reforçado (%)	0,0332 ³	0,0321	3
	Total	1,03	1	100

³ **Peso** = (Palvenaria - Pbetao) - [(Padobe - Palvenaria) - 0,1536] - Palvenaria

(Martins, 2012) (Martins, 2012)_N Média Peso Peso_N					
Ambiente Construído	Número de Pisos				
	População Residente <14 anos de idade (%)	0,379	0,2034	0,2034	20
	População residente entre os 15 e 64 anos de idade (%)	0,621	0,3333	0,3333	33
	População residente >65 anos de idade (%)	0,863	0,4632	0,4632	46
	Total	1,86	1,000	1	99

(Martins, 2012) Peso		
Ambiente Construído	Tipo de Funções	
	Edifícios que são exclusivamente/principalmente casas (%)	0,621
	Edifícios que têm principalmente uma função não residencial (%)	0,379
	Total	1

(Martins, 2012) Peso			
Ambiente Construído	Tipo de Ocupação do Alojamento		
	Habitações clássicas ocupadas pelo proprietário (%)	0,379	38
	Habitação clássica ocupada por arrendatário (%)	0,621	62
	Total	1	100

(Jena et al., 2020) Peso			
Ambiente Construído	Área dos Alojamentos		
	Área útil do alojamento até 49 m²	0,3	30
	Área útil do alojamento de 50 a 99 m²	0,25	25
	Área útil do alojamento de 100 a 149 m²	0,2	20
	Área útil do alojamento de 150 a 199 m²	0,15	15
	Área útil do alojamento de 200 ou mais m²	0,1	10
	Total	1	100

(Rezai & Panahi, 2015) (Jena et al., 2020) (Rezai & Panahi, 2015)_N (Jena et al., 2020) _N Média Peso						
Ambiente Construído	Densidade de Edificado					
	Densidade de Edificado	0,122	0,229	1	1	100
	Total	0,122	0,229	1	1	100

		(Bathrellos et al., 2017)	(Skilodimou et al., 2019)	(Bathrellos et al., 2017)_N	(Skilodimou et al., 2019)_N	Média	Peso
Solos	Litologia						
	Litologia	0,109	0,110	1	1	1	100
	Total	0,109	0,110	1	1	1	100

		(Bathrellos et al., 2017)	(Skilodimou et al., 2019)	(Bathrellos et al., 2017)_N	(Skilodimou et al., 2019)_N	Média	Peso
Solos	Falhas						
	Distância de Falhas	0,057	0,056	1	1	1	100
	Total	0,057	0,056	1	1	1	100

		(Martins, 2012)	(Bathrellos et al., 2017)	(Skilodimou et al., 2019)	(Martins, 2012)_N	(Bathrellos et al., 2017)_N	(Skilodimou et al., 2019)_N	Média	Peso
Solos	Uso do Solo								
	Uso do Solo	0,375	0,044	0,044	1	1	1	1	100
	Total	0,375	0,044	0,044	1	1	1	1	100

		(Rezai & Panahi, 2015)	(Rezai & Panahi, 2015)_N	Peso
Acessibilidade e Segurança	Distância de Hospitais			
	Distância de Hospitais	0,126 ⁴	1	100
	Total	0,126	1	100

⁴ assume o valor atribuído pelos autores aos Quartéis de Bombeiros

(Rezai & Panahi, 2015) (Rezai & Panahi, 2015)_N Peso				
Acessibilidade e Segurança	Distância de Centros de Saúde			
	Distância de Centros de Saúde	0,109 ⁵	1	100
	Total	0,109	1	100

⁵ assume o valor atribuído pelos autores aos Hospitais

(Rezai & Panahi, 2015) (Rezai & Panahi, 2015)_N Peso				
Acessibilidade e Segurança	Distância de Quartéis de Bombeiros			
	Distância de Quartéis de Bombeiros	0,202 ⁶	1	100
	Total	0,202	1	100

⁶ assume o valor atribuído pelos autores às Esquadras da Polícia

(Rezai & Panahi, 2015) (Rezai & Panahi, 2015)_N Peso				
Acessibilidade e Segurança	Distância de Quartéis da Proteção Civil			
	Distância de Quartéis da Proteção Civil	0,064	1	100
	Total	0,064	1	100

(Rezai & Panahi, 2015) (Rezai & Panahi, 2015)_N Peso				
Acessibilidade e Segurança	Distância de Esquadras da Polícia			
	Distância de Esquadras da Polícia	0,223 ⁷	1	100
	Total	0,223	1	100

⁷ assume o valor atribuído pelos autores à Rede Rodoviária

(Rezai & Panahi, 2015) (Rezai & Panahi, 2015)_N Peso				
Acessibilidade e Segurança	Distância de Espaços Verdes			
	Distância de Espaços Verdes	0,272	1	100
	Total	0,272	1	100

(Skilodimou et al., 2019) (Skilodimou et al., 2019)_N Peso				
Tsunami	Modelo Digital de Terreno			
	Modelo Digital de Terreno	0,139	1	100
	Total	0,14	1	100

ANEXO C: ATRIBUIÇÃO DOS PESOS DE NÍVEL 2

		(Martins, 2012)	(Rezai & Panahi, 2015)	(Rezai & Panahi, 2015) _N	Média	Média_N	Peso
Demografia	Estrutura Etária	0,321	0,3998	0,4874	0,4042	0,3483	35
	Gênero	0,0736	0,1183	0,1442	0,1089	0,0938	9
	Estrutura Familiar	0,321	-	-	0,321	0,2766	28
	Densidade Populacional	0,2845	0,3022	0,3684	0,3265	0,2813	28
	Total	1	0,82	1	1,16	1	100

		(Martins, 2012)	(Walker et al., 2014)	(Rezai & Panahi, 2015)	(Jena et al., 2020)	(Walker et al., 2014) _N	(Rezai & Panahi, 2015) _N	(Jena et al., 2020) _N	Média	Média_N	Peso
Socioeconomia	IDS	0,2085	-0,1528	-	-	0,7876	-	-	0,4981	0,273	27
	Taxa Analfabetismo	0,4874	-	-	-	-	-	-	0,4874	0,2672	27
	Nível de Educação	0,0956	-	0,1063	0,169	-	0,5919	1	0,5625	0,3083	31
	Taxa de Desemprego	0,2085	-0,0412	0,0733	-	0,2124	0,4081	-	0,2763	0,1515	15
	Total	1	-0,19	0,18	0,17	1	1	1	1,82	1	100

		(Martins, 2012)	(Rezai & Panahi, 2015)	(Jena et al., 2020)	(Jena et al., 2020) _N	Média	Média_N	Pesos
Ambiente Construído	Ano de Construção	0,2364	0,32	-	-	0,2782	0,144	14
	Estrutura do Edificado	0,5007	-	-	-	0,5007	0,2591	26
	Número de Pisos	0,0876	-	-	-	0,0876	0,0453	5
	Tipo de função	0,0876	0,558	-	-	0,3228	0,167	17
	Tipo de Ocupação do Alojamento	0,0876	-	-	-	0,0876	0,0453	5

		(Martins, 2012)	(Rezai & Panahi, 2015)	(Jena et al., 2020)	(Jena et al., 2020)_N	Média	Média_N	Pesos
Ambiente Construído (continuação)	Área do alojamento	-	-	0,24	0,512	0,3759	0,1945	19
	Densidade do Edificado	-	0,122	0,229	0,488	0,2798	0,1448	14
	Total	1	1	0,47	1	1,93	1	100

		(Martins, 2012)	(Bathrellos et al., 2017)	(Skilodimou et al., 2019)	(Martins, 2012)_N	(Bathrellos et al., 2017)_N	(Skilodimou et al., 2019)_N	Média	Média_N	Peso
Solos	Litologia	-	0,109	0,11	-	0,519	0,5238	0,5214	0,4942	49
	Falhas	-	0,057	0,056	-	0,2714	0,2667	0,269	0,255	26
	Uso do Solo	0,375	0,044	0,044	1	0,2095	0,2095	0,2647	0,2508	25
	Total	0,375	0,21	0,21	1	1	1	1,06	1	100

		(Rezai & Panahi, 2015)	Média	Peso
Acessibilidade e Segurança	Distância de hospitais	0,126 ¹	0,126	13
	Distância de centros de saúde	0,109 ²	0,109	11
	Distância de quartéis de bombeiros	0,202 ³	0,202	20
	Distância de esquadras da polícia	0,223 ⁴	0,064	6
	Distância de quartéis da proteção civil	0,064	0,223	22
	Distância de zonas verdes	0,272	0,272	28
	Total	1	1	100

¹ assume o valor atribuído pelos autores aos Quartéis de Bombeiros

² assume o valor atribuído pelos autores aos Hospitais

³ assume o valor atribuído pelos autores às Esquadras da Polícia

⁴ assume o valor atribuído pelos autores à Rede Rodoviária

ANEXO D: ATRIBUIÇÃO DOS PESOS DE NÍVEL 1

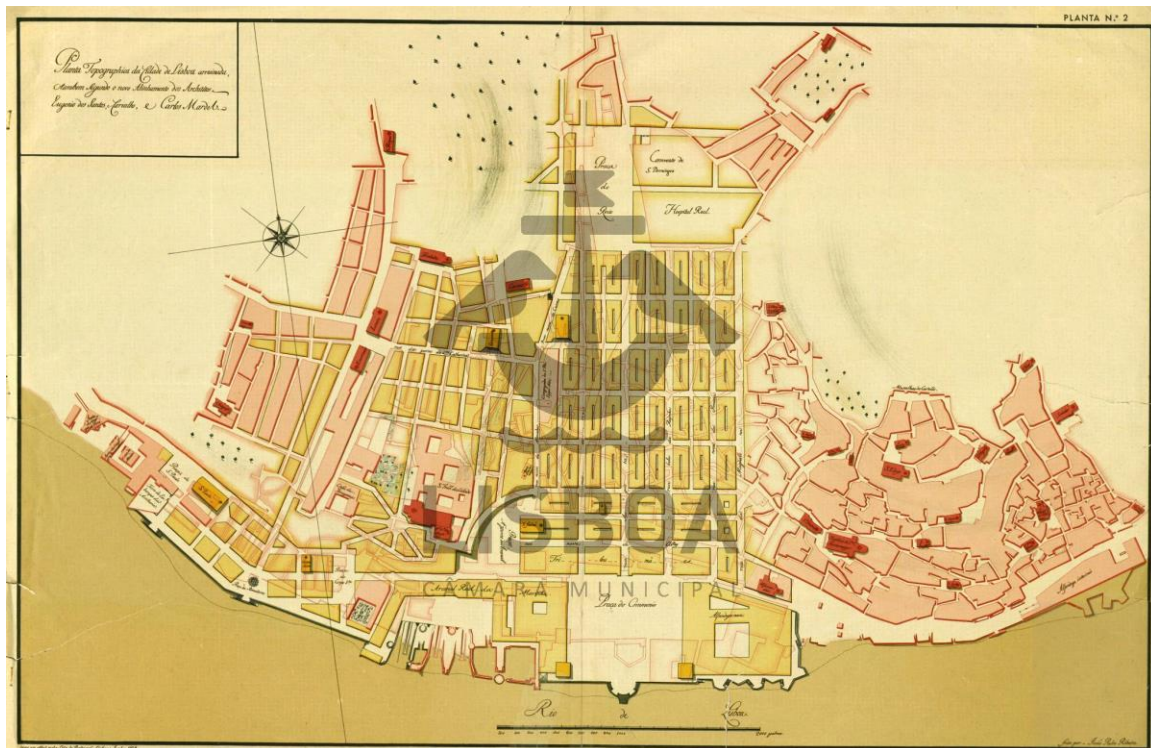
		(Rezai & Panahi, 2015)	(Jena et al., 2020)	Média	Média_N	Peso
Cenário 1	Demografia	0,1	0,3125	0,21	0,19	19
	Socioeconomia	0,1	0,3125	0,21	0,19	19
	Ambiente Construído	0,282	0,238	0,26	0,24	24
	Solos	0,368	0,137	0,25	0,23	24
	Acessibilidade e Segurança	0,15	-	0,15	0,14	14
	Total	1	1	1,08	1	100

		(Rezai & Panahi, 2015)	(Jena et al., 2020)	(Skilodimou et al., 2019)	Média	Média_N	Peso
Cenário 2	Demografia	0,1	0,3125	-	0,21	0,17	17
	Socioeconomia	0,1	0,3125	-	0,21	0,17	17
	Ambiente Construído	0,282	0,238	-	0,26	0,214	22
	Solos	0,368	0,137	-	0,25	0,208	21
	Acessibilidade e Segurança	0,15	-	-	0,15	0,124	12
	Tsunami	-	-	0,139	0,14	0,115	11
	Total	1	1	0,14	1,21	1	100

ANEXO E: PESOS ATRIBUIDOS ÀS VARIÁVEIS DA HIPÓTESE 1

Critérios - Hipótese 1		Peso	Autor(es) de Referência
Estrutura do Edificado	Ambiente Construído	51	(Jena et al., 2020; Rezaie & Panahi, 2015)
	Solos	49	

ANEXO F: PLANTA TOPOGRÁFICA DA CIDADE PÓS-TERRAMOTO



C& SIG





UNIGIS PT



