Modelagem de Risco de Inundação em Aracaju (SE) Utilizando Análise Espacial e Teoria dos Grafos

Ruane Isadora Macêdo dos Santos[1], Jardel dos Santos Oliveira[1], Antônio Augusto S. Reis[1], Alysson Prado Maynart[1], Guilherme Augusto Batista Santos[1], Victor Flávio de Andrade Araujo[2,3]

[1]Sistemas de Informação – Universidade Tiradentes (UNIT)
CEP 49030-490 – Aracaju – SE – Brasil

[2]Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia em Simulação e Monitoramento para Assistência Individual em Eventos Climáticos Extremos (INCT SiMai)

[3]Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul (PUC-RS)

{ruane.isadora, jardel.santos, antonio.augusto, guilherme.augusto, alysson.prado}@souunit.com.br, victor.araujo@edu.pucrs.br

Abstract. *This article proposes a model for flood risk assessment in Aracaju (SE, Brazil) through the integration of Spatial Analysis and Graph Theory. A Composite Risk Index (IRC) was developed for the city's district, combining factors of Average Altitude and Hydrographic Proximity, derived from Digital Elevation Models and vector data. The districs modeled as nodes in a graph, whose edges represent territorial adjacencies. The results identify the district of Santa Maria and Treze de Julho as having the highest risk, and Suíssa and Siqueira Campos as the lowest, revealing a clear spatial gradient. The methodology proved to be robust and replicable, offering a valuable tool for urban planning and risk management.*
Keywords: *Flood Risk; Spatial Analysis; Graph Theory; GIS.*

Resumo. *Este artigo propõe um modelo para avaliação do risco de inundação em Aracaju (SE) por meio da integração de Análise Espacial e Teoria dos Grafos. Desenvolveu-se um Índice de Risco Composto (IRC) para os bairros da cidade, combinando fatores de Altitude Média e Proximidade Hidrográfica, derivados de Modelos Digitais de Elevação e dados vetoriais. Os bairros foram modelados como nós de um grafo, cujas arestas representam adjacências territoriais. Os resultados identificam os bairros de Santa Maria e Treze de Julho como os de maior risco, e Suíssa e Siqueira Campos como os de menor, revelando um gradiente espacial claro. A metodologia mostrou-se robusta e reprodutível, oferecendo uma ferramenta valiosa para o planejamento urbano e gestão de riscos.*
Palavras-chave: *Risco de Inundação; Análise Espacial; Grafos; SIG.*

1. Introdução

A crescente concentração populacional em áreas urbanas, associada à ocupação desordenada de planícies de inundação e à impermeabilização do solo, tem ampliado a suscetibilidade das cidades a eventos hidrológicos extremos [Tucci 2012]. Esse fenômeno é intensificado pelos cenários de **mudanças climáticas globais**, que tendem a aumentar a frequência e a severidade de chuvas intensas e inundações [IPCC 2022]. Nesse contexto, a gestão de riscos ambientais torna-se um requisito essencial para a segurança das populações e a sustentabilidade do desenvolvimento urbano. No Brasil, cidades costeiras e com extensas áreas de baixa altitude apresentam desafios particulares quanto à drenagem e à exposição a enchentes.

Aracaju, capital do estado de Sergipe, localizada na foz do Rio Sergipe, destaca-se como um caso de estudo relevante pela combinação de zonas planas, proximidade a corpos d'água e expansão urbana recente. Assim como o estudo apresentado no XII ENREHSE mapeou áreas vulneráveis a inundações em Aracaju, constatando que episódios recorrentes de alagamento são agravados pela forte impermeabilização do solo, uso inadequado de canais e acúmulo de lixo [Oliveira et al. 2019]. A identificação e a priorização de áreas mais vulneráveis, em escala de bairro, são fundamentais para subsidiar políticas públicas de mitigação, planejamento territorial e gestão de emergências. Modelos tradicionais de previsão de inundações, baseados em simulações hidrológicas e hidráulicas, embora robustos, muitas vezes carecem de flexibilidade para integrar múltiplos fatores geofísicos e espaciais em análises comparativas entre unidades urbanas [Druck et al. 2004]. Diante disso, propõe-se neste trabalho o desenvolvimento de um Índice de Risco Composto que combina a **Análise Geoespacial (SIG)** com Grafos, permitindo uma abordagem mais integrada e escalável para a avaliação do risco de inundação.

A metodologia baseia-se na representação dos bairros como nós de um grafo, interligados por arestas que expressam relações de adjacência geográfica. Tal estrutura possibilita associar atributos e A_i (obtida a partir de Modelos Digitais de Elevação) e a Proximidade Hidrográfica, ao nível de vulnerabilidade de cada unidade territorial. Essa modelagem permite não apenas estimar o risco intrínseco de cada bairro, mas também investigar, em estudos futuros, a propagação espacial de riscos e a resiliência estrutural da rede urbana [Barthélemy 2011].

O objetivo geral deste trabalho é desenvolver e aplicar um Índice de Risco de Inundação Composto para os bairros de Aracaju, utilizando técnicas de modelagem de grafos e SIG. Especificamente, busca-se: (i) carregar, alinhar e processar os dados vetoriais e raster do MDE (Modelo Digital de Elevação); (ii) calcular os atributos de risco de cada bairro, considerando altitude e proximidade de corpos d'água; (iii) modelar a rede de adjacência geográfica entre bairros; e (iv) gerar e analisar o índice composto, permitindo uma classificação espacialmente explícita da vulnerabilidade a inundações.

2. Trabalhos Relacionados

No contexto da avaliação de risco, a literatura enfatiza a distinção entre perigo, vulnerabilidade e exposição, ressaltando que a combinação desses elementos define o risco total de um sistema urbano [Tucci 2012]. O presente estudo concentra-se especialmente nos componentes de perigo e vulnerabilidade física, utilizando variáveis geofísicas como *proxies* mensuráveis a partir de dados espaciais. O avanço das Geotecnologias e dos SIG consoli-

dou o MDE como uma das principais fontes de informação para a caracterização do relevo e a determinação da susceptibilidade a inundações. De acordo com [Pires et al. 2015], a (A_i) e a proximidade de corpos d'água são fatores determinantes na identificação de áreas críticas, permitindo a elaboração de mapas de risco mais precisos e operacionais. A integração de camadas raster e vetoriais, discutida por [Druck et al. 2004], é essencial para garantir consistência espacial e evitar distorções métricas durante o cálculo de atributos altimétricos ou distâncias hidrológicas.

Esses estudos fundamentam a etapa geoespacial da presente pesquisa, que busca representar espacialmente a vulnerabilidade dos bairros de Aracaju por meio de indicadores derivados de MDEs e redes hidrográficas. Mais recentemente, Grafos tem se destacado como uma ferramenta poderosa para modelar a estrutura e a conectividade dos sistemas urbanos. Conforme discutido por [Barthélemy 2011], a representação das cidades como redes complexas permite compreender propriedades emergentes, como centralidade, robustez e resiliência. No contexto de riscos ambientais, essa abordagem tem sido aplicada para modelar fluxos, interdependências e propagação de impactos entre unidades territoriais. Diferentemente das abordagens tradicionais que tratam cada bairro como uma entidade isolada, o presente trabalho propõe o uso da estrutura de grafo como base para a análise multicritério do risco. Cada bairro é representado como um nó interligado por relações de adjacência geográfica, e o IRC é atribuído como atributo de nó, permitindo análises posteriores de conectividade e influência espacial. Essa integração entre o MDE e a modelagem de grafos constitui o diferencial metodológico do estudo, ao combinar atributos físicos e estruturais em uma perspectiva sistêmica e espacialmente coerente.

3. Metodologia

O presente estudo adota uma abordagem quantitativa, espacialmente explícita e multicritério para a avaliação do risco de inundação em escala intraurbana na cidade de Aracaju, Sergipe. O método foi estruturado em quatro fases principais: (i) aquisição e controle de ambiente computacional, (ii) pré-processamento e harmonização geoespacial, (iii) modelagem de grafos de adjacência e (iv) cálculo do IRC. Todas as etapas foram documentadas para garantir reprodutibilidade e transparência científica.

3.1. Configuração do Ambiente Computacional

Para a implementação das etapas de processamento, análise e visualização dos dados, foram empregadas bibliotecas consolidadas do ecossistema científico em Python. No domínio geoespacial, [GeoPandas Developers 2024] foi utilizada para leitura, manipulação e integração de dados vetoriais, permitindo operações como filtragem espacial, reprojeção e união de camadas. Para o tratamento de dados raster, especialmente MDE, recorreu-se ao [Rasterio Contributors 2024], que possibilitou a leitura eficiente de matrizes georreferenciadas, extração de valores altimétricos e geração de mosaicos. A Tabela 1 resume as principais bibliotecas utilizadas e suas finalidades. As bibliotecas apresentadas foram empregadas de forma integrada ao longo do fluxo metodológico, permitindo combinar processamento geoespacial, modelagem em grafos, análises numéricas e visualização dos resultados em um ambiente único de desenvolvimento. Essa integração favorece a reprodutibilidade da metodologia e a organização das diferentes etapas computacionais descritas nas seções seguintes.

Tabela 1. Bibliotecas e Ferramentas Utilizadas

Categoria	Biblioteca	Finalidade
Geoespacial	GeoPandas	Manipulação de dados vetoriais (`Shapefile e GeoJSON`).
Geoespacial	Rasterio	Processamento de dados raster (MDE) e criação de mosaicos.
Geoespacial	Shapely	Análise topológica e cálculo de adjacência e distância geográfica.
Estrutura de Rede	NetworkX	Construção e análise do grafo de conectividade entre bairros.
Numérica	NumPy	Normalização e operações matemáticas vetoriais.
Visualização	Matplotlib	Geração de mapas temáticos e gráficos de risco.

3.1.1. Fontes e Estrutura dos Dados

Os dados geoespaciais foram obtidos do GeoServer da Secretaria Municipal da Fazenda de Aracaju (SEFAZ-SE) [Prefeitura de Aracaju 2023], tendo sido empregadas três classes principais de insumos. A primeira compreende os limites de bairros em formato de polígonos, representados por *shapefiles* contendo as fronteiras administrativas dos bairros de Aracaju, os quais definem as Unidades de UATs. A segunda classe engloba a hidrografia, composta por linhas e polígonos, incluindo *shapefiles* de rios, canais e massas d'água (entre eles o Rio Sergipe e o Rio Poxim), que atuam como variáveis de perigo no modelo. A terceira classe corresponde ao MDE, constituído por arquivos raster em formato *GeoTIFF* com resolução espacial de 30 metros, responsáveis por representar a cota altimétrica da superfície.

3.2. Unificação e Reprojeção dos Dados

Os dados originais dos bairros e MDE foram disponibilizados em arquivos separados por unidade territorial. Para viabilizar a análise, realizou-se um processo de unificação automática via *scripts Python*, conforme o pseudocódigo da [Oliveira and colaboradores 2024]. De forma análoga, os arquivos raster *GeoTIFF* foram reprojetados para o sistema métrico WGS84/UTM Zone 24S (EPSG:32724) e, em seguida, foram unidos em um mosaico. A unificação produziu um mosaico contínuo do terreno e um *shapefile* consolidado com todos os bairros de Aracaju, garantindo a compatibilidade geométrica entre camadas vetoriais e raster.

3.3. Construção da Estrutura de Nós e Arestas

Cada bairro B_i foi modelado como um nó N_i em um grafo não-direcionado $G(V, E)$, sendo V o conjunto de vértices (bairros) e E o conjunto de arestas de adjacência. Duas unidades N_i e N_j foram conectadas por uma aresta E_{ij} quando suas fronteiras apresentam contato topológico válido, seguindo o mesmo critério adotado pela ferramenta da biblioteca [Shapely Developers 2024] que verifica esse tipo de contato entre áreas.

3.4. Atributos de Risco

Para cada nó, foram extraídos dois indicadores primários. O primeiro é a A_i, correspondente à média das alturas dos pixels do MDE contidos dentro dos limites de cada bairro,

obtida a partir do recorte da área do bairro sobre o raster. O segundo é a Proximidade Hidrográfica (Pi), definida como a distância mínima entre o centroide do bairro e o polígono unificado das massas d'água, calculada por meio do ponto dessas áreas mais próximo do centroide, conforme o método utilizado pela biblioteca [Shapely Developers 2024]. Esses atributos definem, respectivamente, a vulnerabilidade física e a exposição hidrológica do território. Conforme já constatado em outros estudos, a inclinação e a elevação são fatores críticos na ocorrência de inundações: elevações e inclinações maiores afetam a direção e a profundidade do movimento da água, levando a um aumento do escoamento superficial, ao passo que inclinações e elevações menores podem resultar em alagamentos [Devi et al. 2025].

3.5. Cálculo do IRC

Os atributos de altitude média (A_i) e proximidade da rede hidrográfica (P_i) foram convertidos para uma escala adimensional no intervalo $[0, 1]$ por meio da **normalização Inversa** (Equação 1). Essa transformação preserva a relação entre as variáveis e o risco de inundação, atribuindo valores normalizados mais elevados aos bairros com menor altitude ou menor distância aos cursos d'água, características associadas a maior suscetibilidade a inundações.

$$R_{norm}(X) = \frac{\frac{1}{X} - \min\left(\frac{1}{X}\right)}{\max\left(\frac{1}{X}\right) - \min\left(\frac{1}{X}\right)} \tag{1}$$

Após a normalização, o IRC de cada bairro foi obtido por meio de uma combinação linear ponderada dos dois componentes normalizados, conforme a **Ponderação e Agregação** (Equação 2). Foram adotados os pesos $\alpha = 0{,}7$ para a altitude e $\beta = 0{,}3$ para a proximidade da rede hidrográfica. Essa ponderação reflete a maior influência da cota altimétrica na ocorrência de inundações em Aracaju, onde extensas áreas urbanas apresentam baixa altitude em relação ao nível do mar.

$$IRC_i = (\alpha \cdot R_{norm,A_i}) + (\beta \cdot R_{norm,P_i}) \tag{2}$$

3.6. Protocolo de Validação e Análise Estatística

Para assegurar a consistência dos resultados, foram adotados quatro mecanismos de validação. O primeiro consiste na verificação topológica, por meio da realização de testes unitários que verificam, em pares de polígonos já conhecidos, se seus limites realmente se tocam ou se há sobreposição entre eles, assegurando que as conexões estejam corretas. O segundo mecanismo é a validação numérica, que compreende a checagem de *pixels* nulos e a análise de consistência dos valores médios de altitude por bairro. O terceiro corresponde à análise estatística, na qual os valores de IRC_i foram avaliados quanto à distribuição, mediana e desvio-padrão, permitindo a identificação de possíveis *outliers*. Por fim, o quarto mecanismo diz respeito à reprodutibilidade: todos os *scripts* utilizados foram versionados e podem ser executados integralmente em ambiente *Python* reproduzível.

4. Resultados e Discussão

Esta seção apresenta os principais resultados obtidos a partir da aplicação da metodologia multicritério e da modelagem de grafos espaciais desenvolvida neste estudo. São

analisadas a estrutura topológica da rede urbana, as estatísticas descritivas do IRC e a distribuição espacial da vulnerabilidade à inundação. A discussão é conduzida à luz da literatura geotecnológica e de estudos sobre risco hidrológico urbano.

4.1. Análise da Estrutura da Rede Geográfica

A aplicação da regra de adjacência espacial, estabelecida pela relação topológica de contato entre polígonos, resultou na geração de um grafo não direcionado $G(V, E)$, no qual os vértices (V) representam os bairros de Aracaju e as arestas (E) indicam relações de vizinhança direta entre eles. O grafo obtido apresentou 48 nós, correspondentes aos bairros do município, 125 relações de adjacência e conectividade média de 2,6 arestas por nó. A topologia obtida confirma a coerência espacial do modelo e estabelece a base estrutural sobre a qual os atributos de risco são integrados. Assim como ocorre na conectividade da rede de drenagem e na propagação de impactos, a estrutura do grafo topológico fornece uma representação das relações espaciais entre os bairros, permitindo analisar como o risco pode se distribuir pela rede urbana. Esses resultados reforçam a relevância de modelar a conectividade espacial para subsidiar intervenções e compreender a organização territorial do município.

No que se refere às barreiras físicas e ao grau de coesão da malha urbana, elementos naturais e antrópicos (como rios, mar, morros e vias expressas) atuam como descontinuidades capazes de reduzir a integração entre bairros. Em Aracaju, bairros costeiros isolados por corpos d'água apresentam baixa acessibilidade em razão de sua descontinuidade com a malha urbana [Carvalho et al. 2024], evidenciando uma rede coesa nas áreas centrais, porém fragmentada nas bordas, o que corrobora a descrição de uma malha urbana integrada, mas não totalmente densa em função das barreiras físicas existentes [Carvalho et al. 2024].

4.2. Estatística Descritiva do ÍRC

O IRC foi calculado para cada um dos 48 bairros com base nos critérios normalizados de Altitude (A_i) e Proximidade Hidrográfica (P_i) [Oliveira and colaboradores 2024], adotando-se, neste cenário, os pesos ($\alpha = 0{,}7$ e $\beta = 0{,}3$). A Tabela 2 apresenta as estatísticas descritivas dos valores obtidos para o índice. Observa-se uma ampla variabilidade entre os bairros, evidenciada pela amplitude total dos valores e pelo desvio-padrão, indicando diferenças expressivas na suscetibilidade à inundação. Além disso, a mediana superior à média sugere uma distribuição assimétrica do IRC, com parte dos bairros apresentando índices elevados, enquanto um conjunto menor concentra valores significativamente inferiores.

Tabela 2. Estatísticas Descritivas do IRC ($\alpha = 0{,}7$; $\beta = 0{,}3$))

Métrica Estatística	Valor (IRC)
Mínimo	$> 0{,}0001$ (*Suíssa*)
Máximo	1,0000 (*Santa Maria*)
Média	0,5940
Mediana	0,7576
Desvio Padrão	0,2500
Amplitude	1,0000

Esses resultados demonstram que, mesmo atribuindo maior peso à variável altitude, permanecem contrastes espaciais relevantes na distribuição do risco de inundação em Aracaju, refletindo a influência conjunta dos fatores topográficos e da proximidade hidrográfica. A distribuição espacial dos valores do IRC é apresentada na Figura 1, permitindo visualizar a variação do índice entre os bairros de Aracaju. A interpretação detalhada dos padrões espaciais observados é apresentada na subseção seguinte.

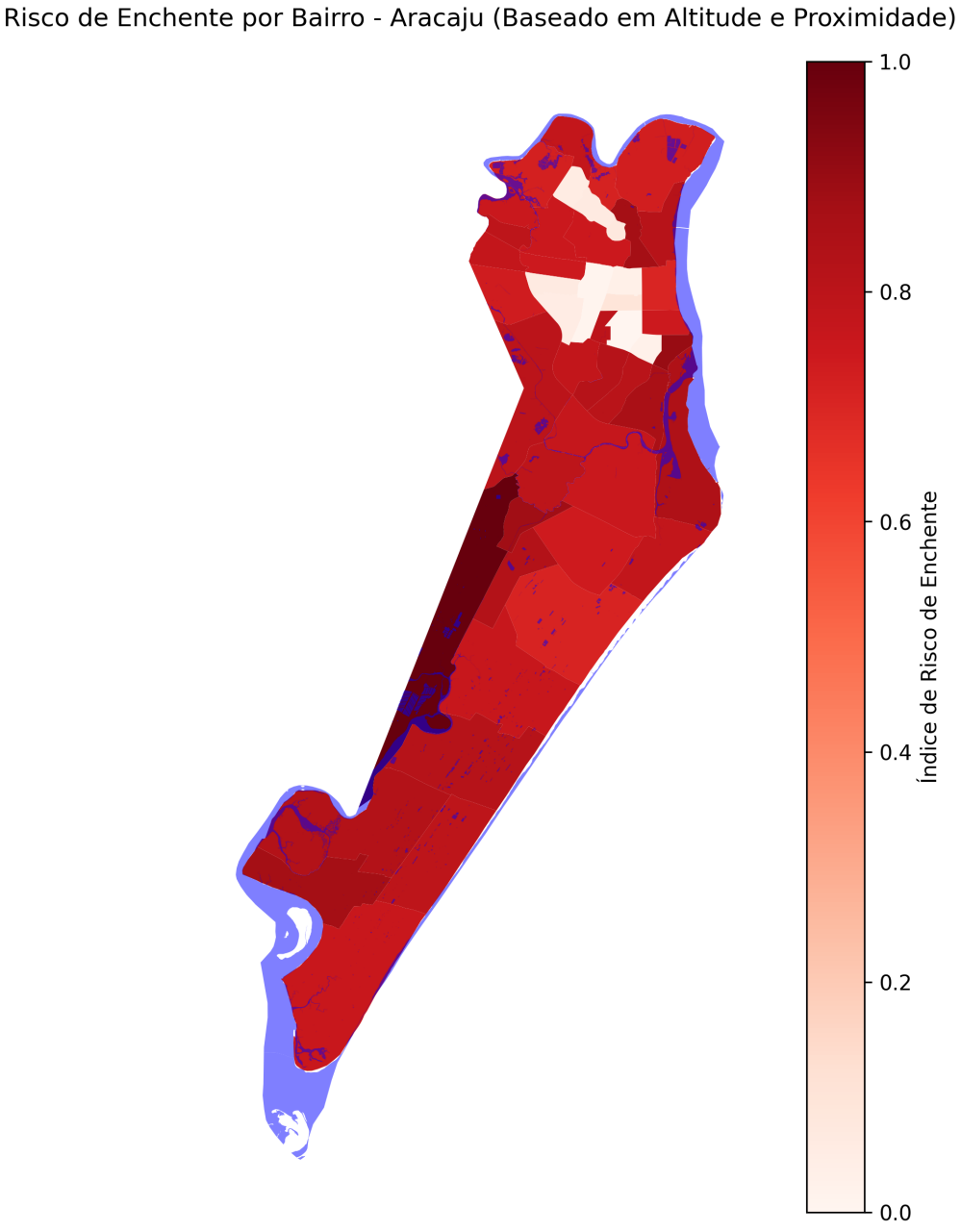


Figura 1. Mapa espacial do IRC para os bairros de Aracaju (proximidade 0.7 e altura 0.3).

4.3. Classificação Espacial do Risco de Inundação

A Tabela 3 apresenta os dez bairros com maior e menor valor de IRC ($\alpha = 0{,}7$; $\beta = 0{,}3$)), representando, respectivamente, as áreas de maior e menor vulnerabilidade hidrológica.

Tabela 3. Top 10 bairros de maior e menor risco de inundação segundo o IRC.

Rank	Bairro	Altitude Média (m)	Proximidade (m)	IRC
Maior Risco				
1	Santa Maria	Baixa (A)	Baixa (P)	1,0000
2	Treze de Julho	Baixa (A)	Média (P)	0,8986
3	Marivan	Baixa (A)	Média (P)	0,8794
4	Santo Antônio	Baixa (A)	Baixa (P)	0,8724
5	Matapoã	Baixa (A)	Média (P)	0,8713
6	Jardins	Baixa (A)	Média (P)	0,8558
7	Coroa do Meio	Baixa (A)	Média (P)	0,8414
8	Dezessete de Março	Baixa (A)	Média (P)	0,8246
9	Areia Branca	Baixa (A)	Média (P)	0,8245
10	Luzia	Baixa (A)	Média (P)	0,8190
Menor Risco				
39	Cirurgia	Alta (A)	Alta (P)	0,0951
40	Palestina	Alta (A)	Alta (P)	0,0760
41	Novo Paraíso	Alta (A)	Alta (P)	0,0658
42	Cidade Nova	Alta (A)	Alta (P)	0,0635
43	Dom Luciano	Alta (A)	Alta (P)	0,0561
44	América	Alta (A)	Alta (P)	0,0539
45	Getúlio Vargas	Alta (A)	Alta (P)	0,0331
46	Salgado Filho	Alta (A)	Alta (P)	0,0242
47	Siqueira Campos	Alta (A)	Alta (P)	0,0089
48	Suíssa	Alta (A)	Alta (P)	0,0000

Os resultados indicam uma polarização espacial do risco, concentrando-se nas regiões de baixa altitude próximas às margens dos rios Sergipe e Poxim. O bairro Santa Maria apresenta o risco máximo ($IRC = 1{,}0000$), reflexo direto de sua baixa altitude e elevada proximidade a corpos d'água. Da mesma forma, bairros como Treze de Julho e Jardins também exibem elevados valores de IRC, evidenciando que as características geomorfológicas consideradas pelo modelo, especialmente a altitude e a proximidade da rede hidrográfica, são determinantes para a classificação do risco. Em contrapartida, bairros como Suíssa e Siqueira Campos, localizados em áreas de maior altitude e mais afastados dos principais cursos d'água, configuram-se como zonas de menor vulnerabilidade hidrológica. Essa distribuição é corroborada pela Figura 1, que evidencia a espacialização do IRC e permite identificar zonas contínuas de alta vulnerabilidade. A análise espacial demonstra um gradiente de risco que decresce do litoral e das margens fluviais em direção às áreas centrais e de maior cota altimétrica, padrão coerente com registros históricos de alagamentos reportados em estudos anteriores e no plano de estudos da Defesa Civil [Coordenadoria Municipal de Defesa Civil de Aracaju 2024].

4.4. Discussão da Ponderação dos Critérios

A ponderação adotada ($\alpha = 0{,}7$ para Proximidade e $\beta = 0{,}3$ para Altitude) mostrou-se adequada para representar a hierarquia de risco em Aracaju. A maior influência atribuída à Altitude reflete a relevância desse fator na dinâmica de inundação em áreas urbanas planas [Devi et al. 2025], onde pequenas variações altimétricas são determinantes para o escoamento superficial. O peso secundário da Proximidade Hidrográfica garante que a influência dos corpos d'água seja mantida, mesmo em bairros não diretamente ribeirinhos. Esse equilíbrio ponderado é coerente com abordagens apresentadas por [do Rio Grande do Norte], que também enfatiza a importância da calibração multicritério para garantir a representatividade espacial do risco. Por fim, destaca-se que o modelo proposto é reprodutível e transparente, uma vez que todos os parâmetros, funções e pesos utilizados podem ser ajustados e replicados com base nos dados geoespaciais abertos do município. Essa característica confere robustez metodológica e aplicabilidade em outros contextos urbanos costeiros.

5. Considerações Finais

O presente estudo atingiu o objetivo de desenvolver e aplicar um IRC para avaliar a suscetibilidade a inundações nos bairros de Aracaju (SE), fundamentado em uma abordagem integrada de SIG, utilizando MDE, dados de hidrografia e princípios da Teoria dos Grafos. A metodologia proposta mostrou-se reprodutível e consistente, garantindo transparência e rastreabilidade em todas as etapas do processo. Os resultados evidenciaram que o risco de inundação apresenta distribuição espacial heterogênea no município, concentrando-se principalmente em áreas de menor altitude e próximas aos cursos d'água. A análise confirmou que fatores altimétricos e a proximidade da rede hidrográfica constituem os principais condicionantes da suscetibilidade às inundações em Aracaju, permitindo identificar bairros com maior potencial de ocorrência desses eventos e fornecendo subsídios para o planejamento urbano e a gestão preventiva do território.

Embora o modelo tenha apresentado resultados consistentes, sua principal limitação reside no fato de considerar predominantemente fatores geofísicos, representando a suscetibilidade intrínseca do terreno à ocorrência de inundações. Dessa forma, o IRC não incorpora variáveis relacionadas à intensidade e à ocorrência de eventos pluviométricos extremos, que desempenham papel determinante na deflagração desses eventos. Assim, o índice deve ser interpretado como um indicador do risco potencial, podendo ser complementado pela integração de informações hidrometeorológicas para uma representação mais abrangente da dinâmica das inundações. Como perspectiva de evolução, incluem-se a incorporação de dados pluviométricos, séries temporais de precipitação e modelos preditivos capazes de relacionar o índice às condições meteorológicas que antecedem eventos extremos.

Em síntese, o trabalho desenvolvido estabelece uma base metodológica consistente para o apoio à tomada de decisão na gestão do risco de inundação, podendo subsidiar o planejamento urbano, a priorização de investimentos em infraestrutura e a formulação de políticas públicas baseadas em evidências, além de servir como referência para aplicações em outros municípios com características geográficas semelhantes.

Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com o apoio do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - Brasil (INCT SiMAI, CNPq #408330/2024-4).

Referências

Barthélemy, M. (2011). Spatial networks. *Physics Reports*, 499(1-3):1–101.

Carvalho, L. M. d. et al. (2024). Tentáculos, blocos e eixos: A sintaxe espacial para o estudo da expansão urbana de aracaju/se. In *Anais do Segundo Simpósio Brasileiro de Sintaxe Espacial*, Brasília, DF. FAU UnB. Acesso em: 03 dez. 2025.

Coordenadoria Municipal de Defesa Civil de Aracaju (2024). *Plano de Contingência 2024 do Município de Aracaju*. Aracaju, SE, Brasil. Acesso em: 26 maio 2026.

Devi, K., Reddy, C. C., Rahul, K., et al. (2025). A holistic methodology for evaluating flood vulnerability, generating flood risk map and conducting detailed flood inundation assessment. *Scientific Reports*, 15:28253.

do Rio Grande do Norte, U. F. Repositório institucional da ufrn. Acesso em: 26 nov. 2025.

Druck, S., Carvalho, M. S., Câmara, G., and Monteiro, A. M. V., editors (2004). *Análise Espacial de Dados Geográficos*. EMBRAPA, Brasília.

GeoPandas Developers (2024). Geopandas documentation. Acesso em: 19 nov. 2025.

IPCC (2022). Climate change 2022: Impacts, adaptation and vulnerability. Acesso em: 10 nov. 2025.

Oliveira, J. S. and colaboradores (2024). Riscoenchentearacaju. Acesso em: 26 nov. 2025.

Oliveira, K. S., Silva, M. L. B. d., and Nascimento, P. S. d. R. (2019). Mapeamento temático de Áreas vulneráveis a riscos de inundações na cidade de aracaju-se. In *XII Encontro de Recursos Hídricos em Sergipe – Á*, pages 1–4, São Cristóvão / Aracaju, SE, Brasil. Associação Brasileira de Recursos Hídricos (ABRHidro). Código do trabalho: ENREHSE0044.

Pires, J., Ferreira, R., and Souza, M. (2015). Modelagem de áreas de inundação e mapeamento de risco utilizando modelos digitais de elevação (mde). *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, 20(2):342–351.

Prefeitura de Aracaju (2023). Geoserver - sistema de informações geográficas da fazenda de aracaju. Acesso em: 12 nov. 2025.

Rasterio Contributors (2024). Rasterio documentation. Acesso em: 19 nov. 2025.

Shapely Developers (2024). Shapely documentation. Acesso em: 19 nov. 2025.

Tucci, C. E. M. (2012). *Hidrologia: Ciência e Aplicação*. Editora da UFRGS, Porto Alegre.