

DOI <http://dx.doi.org/xx.xxxx>

ARTIGO ORIGINAL



Todo o conteúdo deste periódico,
exceto onde identificado, está
licenciado sob uma Licença
Creative Commons.

Desenvolvimento de um índice integrado de vulnerabilidade à inundação: Aplicação ao município de São Gonçalo (RJ)

Evandro da Silva Guimarães Rodrigues*

As inundações representam um dos principais perigos naturais em áreas urbanas, sendo seus impactos negativos intensificados pela ocupação de populações vulneráveis em áreas suscetíveis. O município de São Gonçalo (RJ) enfrenta recorrentes eventos de inundação, com impactos distribuídos de forma desigual entre seus setores censitários. Este trabalho teve como objetivo desenvolver um índice integrado de vulnerabilidade à inundação para o município, avaliando o grau de vulnerabilidade a partir da interação entre condicionantes físicas e socioeconômicas. A metodologia foi estruturada em três etapas: construção de um índice de vulnerabilidade social, a partir de cinco indicadores do Censo 2022 (razão de dependência, alfabetização, esgotamento sanitário, renda e densidade domiciliar); construção de um índice de suscetibilidade, utilizando o Height Above Nearest Drainage (HAND) como proxy da suscetibilidade à inundação; e agregação de ambos por média geométrica, desagregados para uma grade regular de 60 metros. Os resultados revelaram que a vulnerabilidade se concentra nas áreas periféricas do município, e que setores com exposição semelhante à suscetibilidade física apresentam impactos distintos em razão de suas condições socioeconômicas. O índice desenvolvido constitui subsídio para políticas públicas de redução de risco, podendo ser replicado em outros municípios brasileiros carentes de mapeamento de risco hidrometeorológico.

Palavras-chave: Inundação; Vulnerabilidade do lugar; Índice de vulnerabilidade.

* Programa de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) (evandro.rodrigues@inpe.br; <https://orcid.org/0009-0003-8596-7041>).

Introdução

As inundações são fenômenos naturais decorrentes das dinâmicas hidrometeorológicas nas bacias hidrográficas, caracterizadas pelo extravasamento das águas do canal principal de um rio para sua planície de inundação. Esses eventos podem ocorrer por meio de dois tipos de processos, isolados ou combinados: as inundações em áreas ribeirinhas, resultantes da variação espaço-temporal das bacias, e as inundações associadas à urbanização, decorrentes da impermeabilização, do assoreamento e da obstrução da rede hidrográfica (TUCCI et al., 2006).

Apesar de ser um fenômeno natural, as inundações tornam-se um problema quando atingem áreas ocupadas pela população. A suscetibilidade é entendida como fenômeno natural, decorrente das características do próprio ambiente, independentemente de afetar as atividades humanas (SOBREIRA et al., 2021). No entanto, a presença da população em áreas suscetíveis gera a exposição a determinado perigo.

A vulnerabilidade aos perigos naturais é entendida como o potencial de perda, que varia no espaço e no tempo e de acordo com diferentes grupos sociais. Na perspectiva dos perigos, o conceito de vulnerabilidade admite diversas interpretações, sendo uma delas a suposição de que a vulnerabilidade é uma condição social que mede a resistência ou a resiliência aos perigos (CUTTER, 2000; BLAICKIE et al., 1994).

Nesse sentido, a vulnerabilidade social explica a propensão da população aos impactos negativos dos perigos. Trata-se de uma medida que identifica características que aumentam ou diminuem o preparo da população para a resposta e a recuperação diante de um acontecimento perigoso. A vulnerabilidade social também contribui para compreender a relação entre populações vulneráveis e ambientes naturais vulneráveis (CUTTER, 2000).

Nas últimas décadas, a urbanização da população brasileira cresceu de forma acelerada; aproximadamente de 87% da população brasileira concentra-se em áreas urbanas (IBGE, 2022). Em razão do encarecimento do preço da terra e da falta de políticas públicas habitacionais, a população economicamente desfavorecida passou a ocupar as áreas mais periféricas, geralmente suscetíveis ao desenvolvimento de processos do meio natural, o que caracteriza a vulnerabilidade aos perigos naturais.

Avaliar a vulnerabilidade requer analisar holisticamente os fatores biofísicos e os sociais, a fim de identificar como esses fatores interagem e resultam na vulnerabilidade do lugar. Nesse viés, Cutter (1996) estabelece um modelo teórico denominado *Hazard of Place Model*, segundo o qual a interação entre os riscos e as medidas de mitigação produz um potencial perigo. A vulnerabilidade biofísica é determinada pelas características naturais do lugar, enquanto a vulnerabilidade social decorre das características socioeconômicas e da capacidade de enfrentamento. Dessa forma, a interação entre esses dois fatores gera a vulnerabilidade do lugar.

A exposição da população diz respeito à quantidade de pessoas expostas a um determinado perigo. Entretanto, as desigualdades socioeconômicas e espaciais produzem efeitos distintos. Medir a vulnerabilidade consiste em identificar características que influenciam a vulnerabilidade aos riscos e que possibilitam a comparação relativa entre unidades geográficas. Uma abordagem bem consolidada para a geração de índices é a abordagem dedutiva, que se baseia fortemente na literatura para a seleção de variáveis e a composição de um único índice agregado (CUTTER, 2011; BURTON et al., 2018).

O município de São Gonçalo (RJ) enfrenta frequentemente desafios em decorrência de fenômenos naturais, em especial as inundações, que provocam diversas perdas econômicas e imateriais ao município. Essa situação vem se intensificando desde as décadas de 1970 e 1980, quando o município experimentou um grande aumento populacional devido às grandes obras viárias, aos aterros e aos loteamentos realizados em áreas de manguezal e nos leitos de diversos rios (LAFAYETTE PINTO, 2016; TORNIO et al, 2024).

Tornio e Kede (2024) observaram que os bairros ao norte do município apresentam maior vulnerabilidade em razão dos loteamentos feitos de forma imprevidente e, atualmente, concentram os registros de desabrigados, mortos e feridos. Em contraste, os bairros da região oceânica de Niterói registram apenas situações pontuais. O bairro de Itaúna, situado nessas áreas mais vulneráveis, apesar de apresentar um baixo percentual de registros de ocorrências de inundação (2,2%), concentra aproximadamente 47% dos registros de desabrigados e 9,1% dos registros de mortes (TORNIO et al., 2024).

Considerando essa variação espaço-temporal da vulnerabilidade aos impactos negativos dos perigos naturais, a ciência da vulnerabilidade torna-se uma ferramenta importante para fornecer uma base empírica destinada à elaboração de políticas públicas e à redução de riscos, por meio de métricas de análise da vulnerabilidade (CUTTER, 2003, 2011). Nessa perspectiva, os índices de vulnerabilidade têm sido amplamente utilizados para essa análise, assim como existem iniciativas voltadas ao mapeamento da vulnerabilidade dos lugares, tomando como base o modelo teórico *Hazard of Place Model*.

Nascimento Junior et al. (2020) desenvolveram um índice de vulnerabilidade para Santos (SP) por meio de um modelo indutivo, no qual foram inseridas 117 variáveis para a realização da análise de componentes principais. Hidayah et al. (2021) elaboraram um índice multidimensional para sua área de estudo, em Java Oriental, na Indonésia, considerando fatores físicos, ambientais e sociais, com base no processo analítico hierárquico (AHP). Goel et al. (2021) também propuseram um índice de vulnerabilidade como etapa para a composição de um índice de risco para o município de Rio Negrinhos (RJ).

Apesar do grande número de trabalhos que propõem o mapeamento da vulnerabilidade ou do risco, ainda há a necessidade de reduzir a unidade de análise. O uso de limites administrativos, como municípios, reduz o nível de detalhamento, uma vez que não considera as variações internas. Por outro lado, os setores censitários constituem uma das menores unidades de análise possíveis, já que representam a base de coleta de dados censitários e amostrais. Entretanto, setores de grande extensão, ou localizados em áreas rurais com baixa densidade demográfica, apresentam distribuição distinta das áreas urbanas. Ao utilizar esses limites, assume-se que a população está igualmente distribuída pela unidade de análise.

Em contrapartida, a utilização de grades de células tem se apresentado como alternativa aos estudos populacionais, tanto em áreas urbanas quanto em áreas não urbanas. Uma grade populacional é formada por células com formato e padrão regulares, podendo conter informações relativas à população residente (SALGADO et al., 2025). As grades populacionais são de grande utilidade para a formulação de políticas públicas, pois permitem estruturar intervenções em diferentes níveis territoriais (LLOYD et al., 2017; SALGADO et al., 2025).

Diante disso, considerando a frequência das inundações no município de São Gonçalo (RJ)

e seus impactos associados a diferentes grupos socioeconômicos, este estudo questiona como os fatores físicos e sociais interagem para produzir diferentes graus de vulnerabilidade nas áreas. Portanto, o objetivo principal deste trabalho foi desenvolver um índice integrado de vulnerabilidade à inundação e avaliar o grau de vulnerabilidade a esse perigo, considerando a exposição e as condicionantes socioeconômicas e físicas.

Metodologia

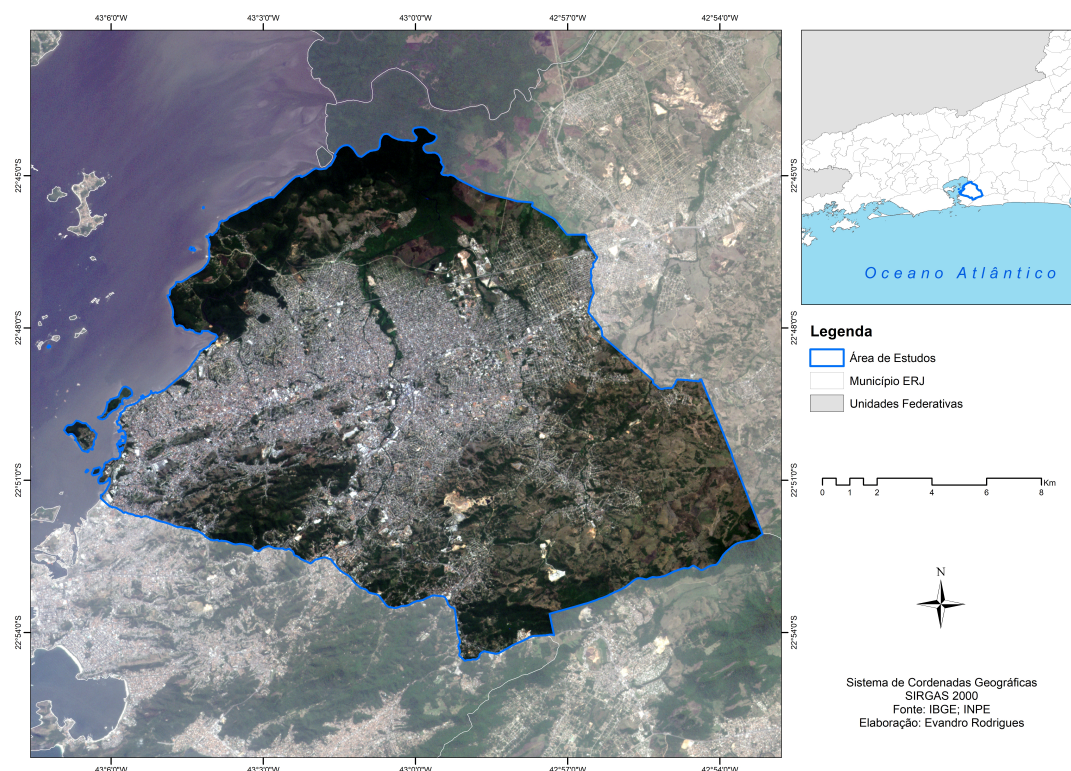
Área de estudo

A área de estudo corresponde ao município de São Gonçalo (RJ) (Figura 1), segundo mais populoso do estado do Rio de Janeiro, com densidade demográfica superior a 3.600 hab./km². Esse alto contingente populacional está associado à inauguração da Ponte Presidente Costa e Silva (Ponte Rio-Niterói), na década de 1970, que, aliada ao desenvolvimento dos meios de transporte, permitiu fluxos diários em distâncias maiores. Esse fator, somado à especulação do solo no Distrito Federal, tornou o município uma opção alternativa de moradia para a população de classe baixa (MACHADO et al, 2012; COSTA, 2017).

Machado et al. (2012) apontam que o desenvolvimento urbano do município no século XX esteve ligado principalmente à industrialização. O desenvolvimento urbano e industrial do Rio de Janeiro alcançou a porção ocidental da baía de Guanabara, região que desenvolveu aptidão industrial e atraiu empreendimentos nacionais e internacionais. As condições geográficas locais, como a hidrografia e o relevo, favoreceram a instalação das fábricas.

A queda da exportação de produtos agrícolas, como a laranja, reduziu a renda e o preço da terra, o que desencadeou loteamentos urbanos concomitantes ao surto de industrialização. Com isso, as “cidades dormitório” cresceram ao redor do Rio de Janeiro. Esse processo, somado à crise habitacional, tornou a região uma opção viável de moradia, mesmo em comparação aos bairros mais afastados do Distrito Federal (MACHADO et al., 2012). Gonçalves (2012) afirma que, a partir da década de 1970, o crescimento territorial atingiu sua máxima expressão, e os loteamentos passaram a se concentrar nas proximidades de grandes rodovias, como a BR-101 e a Ponte Presidente Costa e Silva.

Figura 1
Localização da área de estudo.



Fonte: O autor, 2025

Dados e métodos

O trabalho foi construído em três etapas fundamentais: a construção do índice de vulnerabilidade socioeconômica, a construção do índice de suscetibilidade, utilizando o *Height Above Nearest Drainage* (HAND) como *proxy* da suscetibilidade à inundação, e, por fim, a agregação desses índices para compor o índice integrado de vulnerabilidade à inundação. Com relação à fonte de dados, foram utilizados dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, nomeadamente as estatísticas do Censo 2022, além de um Modelo Digital de Elevação do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). Os procedimentos foram realizados no software Rstudio e os mapas confeccionados no ArgGIS.

Para a construção do índice de vulnerabilidade, optou-se por um arranjo de cinco indicadores, elaborados com base nas variáveis presentes nos dados do Censo 2022, cuja abrangência geográfica corresponde aos setores censitários localizados na área de estudo. Os indicadores utilizados foram: razão de dependência, percentual de pessoas alfabetizadas, percentual de domicílios com acesso à rede geral ou pluvial de esgotamento sanitário, renda média e média de pessoas por domicílio.

A razão de dependência (RD) (Equação 1) constitui um indicador importante, pois idosos podem apresentar maior dificuldade de locomoção em casos de ocorrência de inundação, assim como crianças podem apresentar maior dependência dos responsáveis. De forma semelhante, a renda é determinante na vulnerabilidade, uma vez que indica a capacidade de enfrentar e de se recuperar dos impactos negativos dos perigos naturais (CUTTER et al., 2000).

$$RD = \frac{\text{Pessoas} < 15 \text{ anos} + \text{Pessoas} \geq 60 \text{ anos}}{\text{População}} \times 100 \quad (1)$$

O percentual de domicílios com acesso a esgotamento sanitário (Equação 2) constitui um indicador da presença de políticas públicas básicas (NAZEER et al., 2019). Além disso, determina a possibilidade de contaminação por doenças de veiculação hídrica em caso de inundações.

$$\text{Esg. sanitário} = \frac{\text{Dom. com acesso a rede geral ou pluvial de esgotamento}}{\text{Dom. particulares ocupados}} \times 100 \quad (2)$$

Da mesma forma, o percentual de pessoas alfabetizadas (Equação 3) está associado à vulnerabilidade, uma vez que determina a capacidade das pessoas em situação de perigo de compreender alertas e instruções (CUTTER et al., 2000).

$$\text{Alfabetização} = \frac{\text{Pessoas}_{\{15+\}} \text{ alfabetizadas}}{\text{Pessoas}_{\{15+\}} \text{ total}} \times 100 \quad (3)$$

A renda média indica a capacidade de absorver ou de se recuperar de perdas, determinando a resiliência aos impactos negativos de desastres (CUTTER, 2000). Foi utilizada a variável “Valor do rendimento médio nominal mensal do responsável”. Por fim, a média de moradores por domicílio indica a quantidade de pessoas possivelmente afetadas; essa variável, proposta por Goerl et al. (2021), foi operacionalizada pela variável “Média de moradores por domicílio”.

Por se tratar de indicadores com medidas e intervalos distintos, estes foram normalizados a fim de colocá-los na mesma escala e torná-los comparáveis entre si. Os indicadores foram tratados pelo método mínimo-máximo (Equação 4 e 5). A renda média, por apresentar *outliers*, recebeu previamente uma transformação logarítmica. Além disso, os indicadores que possuem relação inversa com a vulnerabilidade (renda, alfabetização, esgotamento sanitário) foram ajustados, após a normalização, subtraindo-se de 1 o valor do indicador. Ademais, em razão da alta quantidade de valores ausentes (NA) observada nos dados, optou-se por imputar os valores faltantes pela mediana de cada indicador, de modo a não os perder. Por fim, para compor o índice de vulnerabilidade, os indicadores foram agregados pela média simples.

$$X' = \frac{V - V_{\min}}{V_{\max} - V_{\min}} \quad (4)$$

Ou

$$X' = 1 - \frac{V - V_{\min}}{V_{\max} - V_{\min}} \quad (5)$$

Em que:

X' = valor normalizado do indicador (adimensional (0,1));

V = valor observado do indicador;

$V_{\max}$ = valor máximo do indicador na série de dados;

$V_{\min}$ = valor mínimo do indicador na série de dados.

Índice de Suscetibilidade

O índice de suscetibilidade foi construído tendo como principal dado de entrada o MDE. Esse dado foi normalizado para uma grandeza de distância à rede de drenagem, o HAND, conforme a metodologia detalhada por Rennó et al. (2008). Posteriormente, o HAND teve seus valores normalizados pela função de pertinência Fuzzy trapezoidal (Equação 6), a fim de obter valores entre 0 e 1 e facilitar a operação de composição do índice final (Cox ,1995; Zadeh, 1965).

$$\mu(x) = \begin{cases} 1, & \text{se } x \leq 5 \\ \frac{15 - x}{15 - 5}, & \text{se } 5 < x < 15 \\ 0, & \text{se } x \geq 15 \end{cases} \quad (6)$$

Em que:

- x – valor do HAND (m)
- $\mu(x)$ – Grau de pertinência da classe

Desagregação dos Índices e Agregação do Índice Final

Para desagregar os índices, foi criada uma grade regular com resolução de sessenta metros. Com os pontos de endereço do Cadastro Nacional de Endereços para Fins Estatísticos (CNEFE), foram identificadas as células que continham endereços residenciais. Enquanto o índice de vulnerabilidade foi desagregado somente para as células correspondentes à geometria do setor que continham residências, o índice de suscetibilidade foi desagregado para todas as células, com base na média dos pixels cujo centroide se encontrava na célula ou, secundariamente, na repetição do valor do pixel no centro da célula. Essa operação foi necessária em razão da diferença de resolução espacial entre o dado de suscetibilidade (30 metros) e a grade regular (60 metros). Por fim, para compor o índice integrado de vulnerabilidade à inundação, foi utilizada a média geométrica (Equação 7) do dado de suscetibilidade e do dado de vulnerabilidade.

$$I_g = \left(\prod_{i=1}^n I_i \right)^{\frac{1}{n}} \quad (7)$$

Em que:

I_g = índice integrado (média geométrica);

I_i = valor normalizado do i-ésimo indicador;

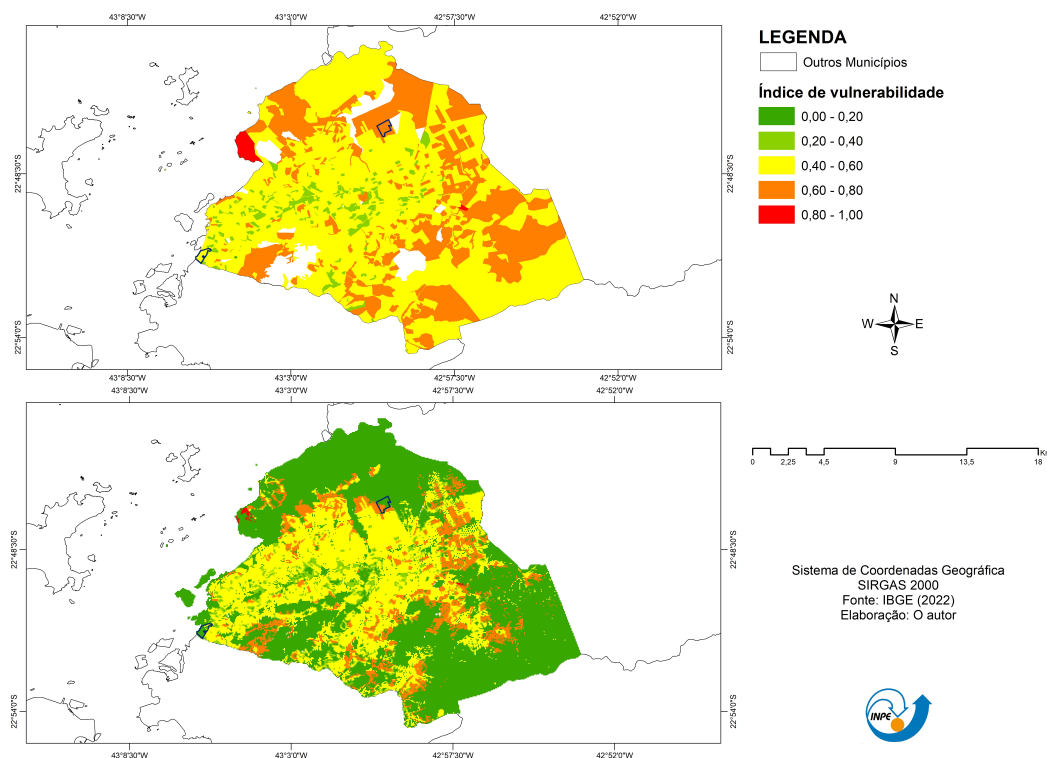
n = número total de indicadores considerados.

Resultados e discussões

Os resultados apontam que a vulnerabilidade está concentrada nos setores censitários das áreas mais periféricas do município, ou seja, nos limites a leste de São Gonçalo (RJ), enquanto as áreas mais centrais do município concentram as classes de vulnerabilidade média e baixa (figura 2). O índice foi calculado primeiramente para o setor e, posteriormente, redistribuído para as áreas residenciais. Dessa forma, áreas antes englobadas em algum nível de vulnerabilidade tiveram seu valor zerado, por não apresentarem habitantes, sendo essas áreas majoritariamente de cobertura natural, mangues ou pastagem (MapBiomass, 2024).

A redistribuição do índice representou um ganho em relação à representação espacial, uma vez que a vulnerabilidade está associada à presença de população. Considerando que a representação por setores censitários indica uma distribuição homogênea da população, a grade regular limitou o índice às áreas onde há residências. Essa etapa se caracterizou como fundamental, pois o objetivo final é um índice que integre os dados de vulnerabilidade e de suscetibilidade, sendo esta última associada aos fatores físicos do terreno e distribuída espacialmente por todo o município. Posto isso, levar o índice para uma grade regular associada à população eliminou a possibilidade de que alguma área sem população fosse calculada como vulnerável.

Figura 2
Índice de vulnerabilidade.



Fonte: O autor

Para avaliar a vulnerabilidade, optou-se por focar em dois setores censitários com característi-

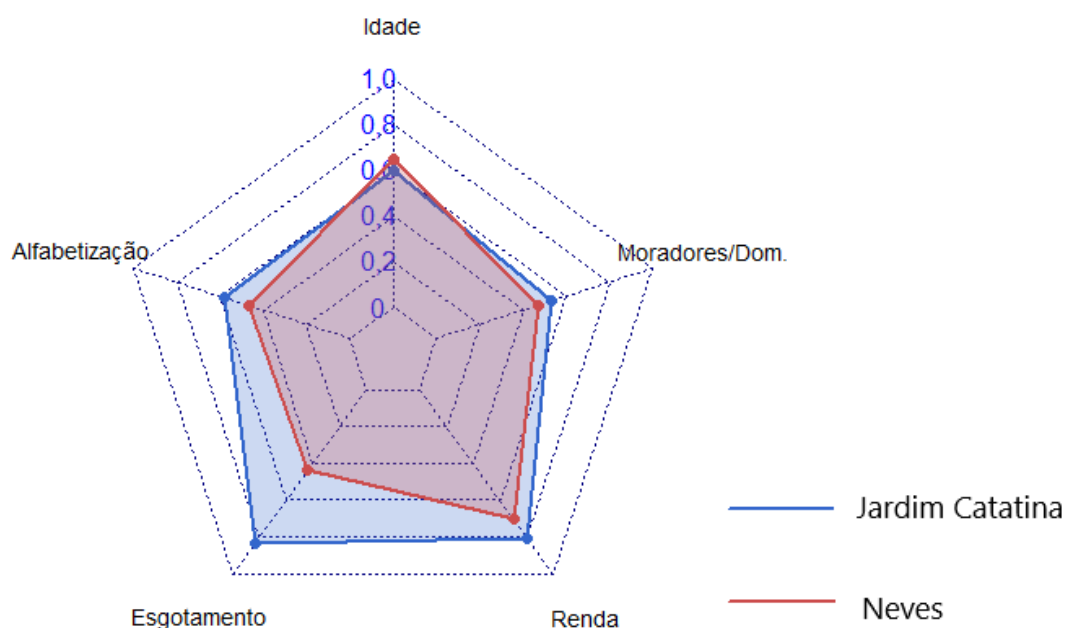
cas distintas. O setor posicionado mais ao norte está localizado no bairro de Jardim Catarina, e o mais ao sul, no bairro de Neves. Ao observar o gráfico de radar (figura 3), é possível identificar o perfil dos indicadores em relação à vulnerabilidade. Cabe mencionar que os indicadores estão normalizados entre 0 e 1, sendo que, quanto mais próximo de 1, maior o nível de vulnerabilidade de cada indicador.

Identifica-se que o setor de Jardim Catarina apresenta, em quase todos os indicadores, os maiores valores de vulnerabilidade. O esgotamento sanitário e a renda apresentam valores mais distantes do centro do gráfico, indicando baixa renda média e baixa cobertura de saneamento básico. Os demais indicadores apresentaram valores semelhantes entre si. Portanto, nesse setor, o esgotamento sanitário e a renda são os indicadores que mais contribuem para o aumento da vulnerabilidade.

Por outro lado, no setor de Neves, cujo índice de vulnerabilidade é baixo, os indicadores se comportam de maneira distinta, isto é, com valores majoritariamente inferiores aos do setor de Jardim Catarina. A renda foi o indicador de maior valor, enquanto os demais estiveram mais próximos do centro do gráfico. No entanto, a razão de idade foi o indicador com o valor mais distante do centro após a renda média, sendo inclusive superior ao registrado no setor de Jardim Catarina, o que aponta uma quantidade mais expressiva de pessoas em idade vulnerável nesse setor.

Figura 3

Perfil da vulnerabilidade nos setores de Jardim Catarina e Neves.



Fonte: O autor

Ao observar a relação entre os dois componentes (vulnerabilidade e suscetibilidade) e o índice final (figura 4), percebe-se que, embora existam expressivamente áreas suscetíveis à inundação no município, por não serem ocupadas, a vulnerabilidade à inundação é baixa, uma vez que a vulnerabilidade está associada à presença de população com baixo preparo ou condições socioeconômicas desfavoráveis. Da mesma forma, o índice final indica áreas com vulnerabilidade

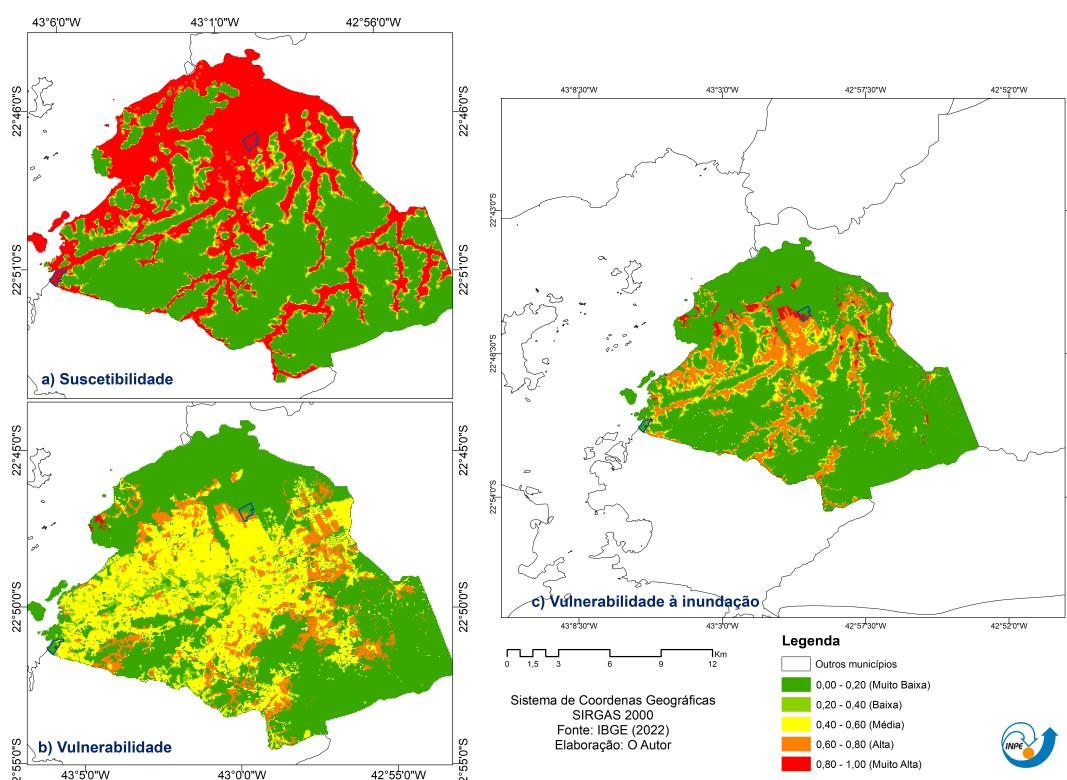
à inundação zero, onde há população vulnerável, mas em área com baixa suscetibilidade.

Ao analisar comparativamente as áreas selecionadas para avaliação, percebe-se que o setor de Jardim Catarina possui uma vulnerabilidade social alta, assim como o índice de suscetibilidade também apresenta valores elevados, resultando em altos valores no índice de vulnerabilidade à inundação. Enquanto isso, o setor censitário de Neves apresenta vulnerabilidade baixa e, em contrapartida, altos valores de suscetibilidade; essa combinação gerou valores baixos no índice de vulnerabilidade à inundação.

A análise dessas duas situações divergentes confirma a hipótese de que a exposição ao perigo pode produzir diferentes impactos, sendo os impactos negativos geralmente associados às populações mais vulneráveis. O nível de preparo diante de uma possível situação de perigo, assim como a capacidade de recuperação, está fortemente relacionado aos fatores socioeconômicos, que foram determinantes para classificar as duas áreas em níveis distintos de vulnerabilidade à inundação.

Em análise aos eventos de inundação no município entre 2008 e 2018, Tornio et al. (2024) inferiram que o bairro de Jardim Catarina concentra aproximadamente 30% das ocorrências e 17% das mortes. O bairro de Neves apresentou valores inferiores, sendo aproximadamente 3% das ocorrências e 4% das mortes ocorridas em decorrência das inundações. Isso evidencia que os impactos negativos estão fortemente atrelados às condições socioeconômicas do lugar.

Figura 4
Índices de suscetibilidade, vulnerabilidade e índice integrado.



Fonte: o autor

Do ponto de vista da gestão pública, a identificação de áreas vulneráveis à inundação é fundamental para delimitar áreas prioritárias para a implementação de políticas públicas e

para direcionar ações de intervenção, em caso de perigo, de forma eficaz. Considerando o aumento dos impactos negativos dos perigos naturais nas últimas décadas e sua tendência de crescimento (UNDRR, 2022), é essencial que o poder público antecipe ações de intervenção e redução de riscos, e não apenas atue na gestão de crises. A Política Nacional de Defesa Civil delega aos municípios a responsabilidade de mapear áreas de risco a desastres, do mesmo modo que estabelece, como competência, a articulação entre União, estados e municípios para o mapeamento da suscetibilidade e da vulnerabilidade. No entanto, a realidade indica que poucos municípios adotam estratégias de redução de risco (ALVES et al., 2025).

Nesse sentido, ressalta-se que o índice de vulnerabilidade à inundação em células representa um ganho significativo em relação a abordagens por outras unidades administrativas, pois permite apontar, com melhor precisão, as áreas com potencial impacto negativo.

Considerações finais

O presente trabalho apresentou um índice de vulnerabilidade à inundação para o município de São Gonçalo (RJ), cuja escala de análise foi a grade celular de resolução de 60 metros. O trabalho apontou e evidenciou que populações com o mesmo nível de exposição podem sofrer impactos distintos em razão de suas condições socioeconômicas. Além disso, apresentou o índice como subsídio para a orientação de políticas públicas de redução de riscos, conforme estabelecido na PNPDEC, podendo ainda ser replicado para outras áreas de estudo, uma vez que milhares de municípios brasileiros carecem de mapeamento de riscos hidrometeorológicos.

Embora o resultado final tenha sido satisfatório, cabe mencionar certas limitações. Primeiramente, durante o desenvolvimento do índice, notou-se um grande número de dados faltantes, que foram substituídos pela mediana, a fim de não perder valores de setores inteiros. Outro destaque relaciona-se aos *outliers* observados no indicador de renda, que podem distorcer os demais valores; o tratamento por transformação logarítmica não solucionou completamente essa questão. Para trabalhos futuros, pretende-se saturar os setores com *outliers*, substituindo-os pelo segundo maior valor. Ademais, pretende-se utilizar estatísticas espaciais de análise de agrupamento para analisar a vulnerabilidade e a vulnerabilidade à inundação.

Referências

- ALVES, P. J.; LIMA, R. C.; EMANUEL, A. L. The effectiveness of disaster risk management policies in Brazilian municipalities. *Papers in Regional Science*, [s. l.], 2025. DOI: 10.1016/j.pirs.2025.100080.
- BLAIKIE, P.; CANNON, T.; DAVIS, I.; WISNER, B. *At Risk: Natural Hazards, People's Vulnerability, and Disasters*. London: Routledge, 1994.
- BURTON, C.; RUFAT, S.; TATE, E. Social Vulnerability. In: FUCHS, S.; THALER, T. (ed.). *Vulnerability and Resilience to Natural Hazards*. Cambridge: Cambridge University Press, 2018. p. 53-81.
- COSTA, F. H. L. *Estudo da suscetibilidade a inundações na bacia hidrográfica do Rio Alcântara (RJ): subsídios ao desenvolvimento de metodologias para avaliação de enchentes urbanas*. 2017. Dissertação (Mestrado) – Universidade do Estado do Rio de Janeiro, São Gonçalo, 2017.
- COX, E. The fuzzy systems: handbook a practitioner's guide to building, using and maintaining fuzzy systems. London: Academic Press, 1994. 625 p
- CUTTER, S. L. Vulnerability in Environmental Hazards. *Progress in Human Geography*, [s. l.], v. 20, n. 4, p. 529-539, 1996.
- CUTTER, S. L. The Vulnerability of Science and the Science of Vulnerability. *Annals of the Association of American Geographers*, [s. l.], v. 93, n. 1, p. 1-12, 2003.
- CUTTER, S. L. A ciência da vulnerabilidade: modelos, métodos e indicadores. *Revista Crítica de Ciências Sociais*, [s. l.], n. 93, 2011. Disponível em: <http://journals.openedition.org/rccs/165>. DOI: 10.4000/rccs.165. Acesso em: 19 abr. 2019.
- CUTTER, S. L.; MITCHELL, J. T.; SCOTT, M. S. Revealing the Vulnerability of People and Places: A case study of Georgetown County, South Carolina. *Annals of the Association of American Geographers*, [s. l.], v. 90, n. 4, p. 713-737, 2000.
- GOERL, R. F.; KOBIYAMA, M.; PELLERIN, J. R. G. M. Proposta metodológica para mapeamento de áreas de risco a inundação: estudo de caso do município de Rio Negrinho – SC. *Boletim de Geografia*, [s. l.], v. 30, n. 1, p. 81-100, 2012. DOI: 10.4025/bolgeogr.v30i1.13519.
- GONÇALVES, T. G. B. *Periferias segregadas, segregação nas periferias: por uma análise das desigualdades intraurbanas no município de São Gonçalo, RJ*. 2012. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2012.
- HIDAYAH, E. et al. Development of the Flood Vulnerability Index Using a Multi-Element Approach. *Journal of Water and Land Development*, [s. l.], v. 50, n. 50, p. 255-264, set. 2021. DOI: 10.24425/jwld.2021.138181.
- IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. *Censo Demográfico 2022: população e domicílios: primeiros resultados*. Rio de Janeiro: IBGE, 2023. Disponível em: <https://biblioteca.ibge.gov.br/index.php/biblioteca-catalogo?view=detalhes&id=2102011>.

LAFAYETTE PINTO, R. *Um século de temporais, mudanças na paisagem e efeitos colaterais em Niterói e São Gonçalo*. 2016. 238 f. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Faculdade de Formação de Professores, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, São Gonçalo, 2016.

LLOYD, C. T.; SORICHETTA, A.; TATEM, A. J. High resolution global gridded data for use in population studies. *Scientific Data*, [s. l.], v. 4, n. 1, 170001, 2017. DOI: 10.1038/sdata.2017.1.

MAPBIOMAS. *Projeto MapBiomas – Coleção 2025 da Série Anual de Mapas de Cobertura e Uso da Terra do Brasil*. [S. l.]: MapBiomas, 2025. Disponível em: <https://brasil.mapbiomas.org/>. Acesso em: [data de acesso].

NASCIMENTO JÚNIOR, L.; SANT'ANNA NETO, J. L. Índice de vulnerabilidade social a desastres naturais para áreas urbanas. *Revista de Geociências do Nordeste*, [s. l.], v. 6, n. 2, p. 65-72, 2020. DOI: 10.21680/2447-3359.2020v6n2ID19280.

NAZEER, M.; PAKHTUNKHWA, N. K. Flood vulnerability assessment through different methodological approaches in the context of North-West Khyber Pakhtunkhwa, Pakistan. *Sustainability*, [s. l.], v. 11, 6695, 2019. DOI: 10.3390/su11236695.

RENNÓ, C. D. et al. HAND, a new terrain descriptor using SRTM-DEM: Mapping terra-firme rainforest environments in Amazonia. *Remote Sensing of Environment*, [s. l.], v. 112, n. 9, p. 3469-3481, 15 set. 2008.

SALGADO, G. P. L.; DAL'ASTA, A. P.; ADORNO, B. V.; AMARAL, S. Avaliação das Grades Populacionais Globais para Representar a Distribuição da População Residente na Amazônia Brasileira: o Caso do Baixo Tocantins (PA). *Revista Brasileira de Cartografia*, Uberlândia, v. 77, 2025. DOI: 10.14393/rbcv77n0a-75653.

SOBREIRA, F. G.; SOUZA, L. A. Cartografia geotécnica aplicada ao planejamento urbano. *Revista Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental*, [s. l.], p. 79-97, 2012.

TÓRNIO, C. A. A.; KEDE, M. L. F. M. Inundações urbanas: análise dos impactos em São Gonçalo (RJ) entre os anos de 2005 e 2018. *Revista Brasileira de Climatologia*, [s. l.], v. 34, n. 20, p. 813-836, 2024. DOI: 10.55761/abclima.v34i20.17966. Disponível em: <https://ojs.ufgd.edu.br/rbclima/article/view/17966>. Acesso em: 5 jun. 2025.

TUCCI, C. E. M.; MENDES, C. A. *Avaliação Ambiental Integrada de Bacia Hidrográfica*. Brasília: Ministério do Meio Ambiente, 2006.

UNDRR – UNITED NATIONS OFFICE FOR DISASTER RISK REDUCTION. *Global Assessment Report on Disaster Risk Reduction 2022: our world at risk: transforming governance for a resilient future*. Geneva: UNDRR, 2022.

ZADEH, L. A. Fuzzy sets. *Information and Control*, v. 8, n. 3, p. 338-353, jun. 1965. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0019-9958\(65\)90241-X](https://doi.org/10.1016/S0019-9958(65)90241-X).

Sobre os autores

Evandro da Silva Guimarães Rodrigues Geógrafo, formado pela Universidade do Estado do Rio de Janeiro com período sanduíche na Universidade do Porto, Mestrando em Sensoriamento Remoto no Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, Membro do Laboratório de Investigação em Sistemas Sócioambientais (LISS).

Endereço para correspondência

Evandro da Silva Guimarães Rodrigues
Avenida dos Astronautas, 1.758 - Jd. Granja - CEP 12227-010]
São José dos Campos, SP, Brasil

CRedit

Reconhecimentos: [Não aplicável / texto].

Financiamento: Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico.

Conflitos de interesse: Os autores certificam que não têm interesse pessoal, comercial, acadêmico, político ou financeiro que represente um conflito de interesses em relação ao manuscrito.

Aprovação ética: [Número do CAAE; número do parecer, se aplicável].

Disponibilidade de dados e material: [Onde e em que condições os dados estão disponíveis].

Contribuições dos autores:

Evandro da Silva Guimarães Rodrigues: conceituação; análise formal; metodologia; ...

Editores: [Nomes dos editores responsáveis, se aplicável].

Abstract

Development of an Integrated Flood Vulnerability Index: Application to the Municipality of São Gonçalo (RJ)

Floods represent one of the main natural hazards in urban areas, with their negative impacts intensified by the occupation of vulnerable populations in susceptible areas. The municipality of São Gonçalo (RJ) faces recurring flood events, with impacts distributed unevenly across its census tracts. This study aimed to develop an integrated flood vulnerability index for the municipality, assessing the degree of vulnerability based on the interaction between physical and socioeconomic conditioning factors. The methodology was structured in three stages: construction of a social vulnerability index based on five indicators from the 2022 Census (dependency ratio, literacy, sanitary sewage, income, and household density); construction of a susceptibility index using Height Above Nearest Drainage (HAND) as a proxy for flood susceptibility; and aggregation of both by geometric mean, disaggregated to a regular 60-meter grid. The results revealed that vulnerability is concentrated in the municipality's peripheral areas, and that census tracts with similar exposure to physical susceptibility experience different impacts due to their socioeconomic conditions. The developed index provides support for public policies aimed at risk reduction and can be replicated in other Brazilian municipalities lacking hydrometeorological risk mapping.

Keywords: Hazard-of-place; vulnerability; flood

Resumen

Desarrollo de un índice integrado de vulnerabilidad a las inundaciones: Aplicación al municipio de São Gonçalo (RJ)

Las inundaciones representan uno de los principales peligros naturales en áreas urbanas, siendo sus impactos negativos intensificados por la ocupación de poblaciones vulnerables en áreas susceptibles. El municipio de São Gonçalo (RJ) enfrenta recurrentes eventos de inundación, con impactos distribuidos de forma desigual entre sus sectores censales. Este trabajo tuvo como objetivo desarrollar un índice integrado de vulnerabilidad a las inundaciones para el municipio, evaluando el grado de vulnerabilidad a partir de la interacción entre condicionantes físicos y socioeconómicos. La metodología fue estructurada en tres etapas: construcción de un índice de vulnerabilidad social, a partir de cinco indicadores del Censo 2022 (razón de dependencia, alfabetización, alcantarillado sanitario, ingresos y densidad domiciliaria); construcción de un índice de susceptibilidad, utilizando el Height Above Nearest Drainage (HAND) como proxy de la susceptibilidad a las inundaciones; y agregación de ambos por media geométrica, desagregados para una cuadrícula regular de 60 metros. Los resultados revelaron que la vulnerabilidad se concentra en las áreas periféricas del municipio, y que sectores con exposición similar a la susceptibilidad física presentan impactos distintos debido a sus condiciones socioeconómicas. El índice desarrollado constituye un insumo para políticas públicas de reducción de riesgo, pudiendo ser replicado en otros municipios brasileños carentes de mapeo de riesgo hidrometeorológico.

Palabras clave: Peligro del lugar; vulnerabilidad; inundación.