

INDICADOR DE VULNERABILIDADE À INJUSTIÇA CLIMÁTICA FRENTE A ENCHENTES URBANAS

Giovanna Maciel Baudenbacher¹ ; Carolina de Almeida Lopes¹ ; Emily Akiye Furlan¹ ; Giovana da Assunção Ramos¹ ; Maria Eduarda Pierami¹ ; William Dantas Vichete¹

RESUMO – A intensificação das mudanças climáticas tem aumentado a ocorrência de enchentes urbanas, afetando de forma desigual populações vulneráveis. Este trabalho propõe um Indicador de Vulnerabilidade à Injustiça Climática (IVIC), integrando dimensões socioeconômicas, ambientais e climáticas para apoiar a tomada de decisão. A metodologia baseia-se em um índice multivariado normalizado (0-1), que combina vulnerabilidade social, suscetibilidade a enchentes por análise multicritério e projeções de chuvas extremas, com dados processados em ambiente computacional. Aplicado à bacia do rio Sorocaba e Médio Tietê, o indicador permitiu comparar municípios e identificar áreas com maior sobreposição de vulnerabilidades. Os resultados mostram que o modelo destacou regiões prioritárias para intervenção e evidenciou desalinhamentos entre vulnerabilidade e investimentos públicos. A abordagem contribui para uma alocação mais eficiente, transparente e equitativa de recursos, fortalecendo estratégias de adaptação climática e gestão de riscos urbanos.

Palavras-Chave – Sustentabilidade; Mudanças climáticas; Socioambiental.

ABSTRACT– The intensification of climate change has increased urban flooding, disproportionately affecting vulnerable populations. This study proposes a Climate Injustice Vulnerability Indicator (CIVI) integrating socioeconomic, environmental, and climatic dimensions to support decision-making. The methodology is based on a normalized multivariate index (0-1), combining social vulnerability, flood susceptibility through multicriteria analysis, and projections of extreme rainfall, with data processed computationally. Applied to the Sorocaba and Médio Tietê river basin, the indicator enabled comparisons among municipalities and identified areas with overlapping vulnerabilities. Results show that the model highlighted priority regions for intervention and revealed mismatches between vulnerability levels and public investments. The proposed approach supports more efficient, transparent, and equitable resource allocation, contributing to climate adaptation strategies and improved urban risk management.

Key-words – Sustainability; climate change; socio-environmental.

¹) Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” (UNESP), Instituto de Ciência e Tecnologia - Campus Sorocaba. Avenida Três de Março, 511 - Alto da Boa Vista, Sorocaba/SP - CEP 18087-180 - Telefone: (15) 3238-3400 - Fax: (15) 3228-2842 - E-mail: giovanna.baudenbacher@unesp.br.

1. INTRODUÇÃO

A intensificação das mudanças climáticas tem ampliado a frequência e a magnitude de eventos extremos de precipitação, sendo um dos principais desafios à sustentabilidade urbana contemporânea. Em ambientes altamente urbanizados, caracterizados pela impermeabilização do solo e pela heterogeneidade socioespacial, as enchentes urbanas passam a representar não apenas um problema hidrológico, mas também um fenômeno de injustiça climática, com impactos desproporcionais sobre populações mais vulneráveis. De acordo com o IPCC (IPCC, 2022), há evidências do aumento na intensidade e frequência de eventos de precipitação extrema, incluindo a América do Sul. Estudos como Blöschl et al. (2019), Westra et al. (2014) e Fowler et al. (2021) demonstram que mudanças nos extremos hidrológicos estão fortemente associadas ao aquecimento global. No contexto urbano, pesquisas como as de Bigi et al. (2021), Moreira, Brito e Kobiyama (2021) e Winsemius et al. (2018) evidenciam que a vulnerabilidade a enchentes é amplificada por fatores socioeconômicos, pela ocupação irregular do território e pela limitada capacidade adaptativa das populações, reforçando a necessidade de abordagens integradas entre clima, território e sociedade.

Nos últimos anos, os estudos têm buscado avançar na análise do risco de enchentes por meio da integração de indicadores compostos que combinam perigo, exposição e vulnerabilidade, conforme proposto por Cutter et al. (2003) e posteriormente ampliado em índices como o Social Vulnerability Index (SVI) (Cutter, Boruff e Shirley, 2003; Von Szombathély et al., 2023). Abordagens baseadas em análise multicritério e integração de variáveis ambientais e socioeconômicas também têm sido amplamente utilizadas para mapear suscetibilidade e risco em ambientes urbanos (de Brito et al., 2018; Kazakis et al., 2015). Paralelamente, avanços em modelagem climática e bases de dados, como o CMIP6, têm permitido a incorporação de projeções futuras de precipitação extrema em estudos hidrológicos (Eyring et al., 2016; O'Neill et al., 2016). No entanto, persistem lacunas importantes tanto na literatura quanto na prática de gestão urbana. Observa-se uma fragmentação entre diagnósticos técnicos e instrumentos efetivos de tomada de decisão, bem como a ausência de ferramentas integradas capazes de traduzir informações complexas, como mudanças nos padrões de precipitação extrema, em subsídios operacionais para a alocação estratégica de recursos públicos. Além disso, planos de ação climática urbanos frequentemente carecem de indicadores quantitativos que permitam monitorar, comparar e priorizar intervenções de forma sistemática e baseada em evidências (Reckien et al., 2018; Araos et al., 2016).

Diante desse contexto, o presente trabalho tem como objetivo propor uma estrutura metodológica para a construção de um Indicador de Vulnerabilidade à Injustiça Climática (IVIC) frente a enchentes urbanas, integrando dimensões socioeconômicas, suscetibilidade hidrológica e mudanças projetadas nos padrões de precipitação extrema. A proposta busca contribuir para a superação da lacuna entre análise técnica e tomada de decisão, ao fornecer uma métrica integrada, interpretável e aplicável ao planejamento urbano. A relevância dessa abordagem reside na sua capacidade de apoiar a alocação mais eficiente, transparente e equitativa de recursos públicos, especialmente em contextos marcados por restrições orçamentárias e desigualdades territoriais, conforme discutido por Hallegatte et al. (2013) e Meerow, Newell e Stults (2016). A metodologia foi aplicada aos municípios da bacia hidrográfica do rio Sorocaba e Médio Tietê (UGRHI 10), uma região caracterizada por elevada heterogeneidade socioeconômica, forte processo de urbanização e recorrência de eventos de inundação, configurando-se como um ambiente representativo para a análise de vulnerabilidade à injustiça climática e para o desenvolvimento de instrumentos de apoio à gestão de riscos urbanos.

2. OBJETIVOS

Este trabalho tem como objetivo propor uma estrutura metodológica para construção de um Indicador de Vulnerabilidade à Injustiça Climática frente a enchentes urbanas, integrando as mudanças nos padrões de precipitação extrema, risco hidrológico e assimetrias socioespaciais.

3. METODOLOGIA

A metodologia proposta no presente trabalho consiste na elaboração de um Indicador de Vulnerabilidade à Injustiça Climática (IVIC) frente a enchentes urbanas. O modelo, desenvolvido mediante técnicas de processamento computacional, integrou dados de natureza socioeconômica, métricas de suscetibilidade a enchentes e projeções de intensificação de eventos pluviométricos extremos. A expressão final do Indicador assume valores normalizados no domínio $[0, 1]$ e representa gradações de vulnerabilidade, sendo as magnitudes mais elevadas equivalentes a maior vulnerabilidade à injustiça climática. A Figura 1 apresenta o fluxograma geral de construção do IVIC.

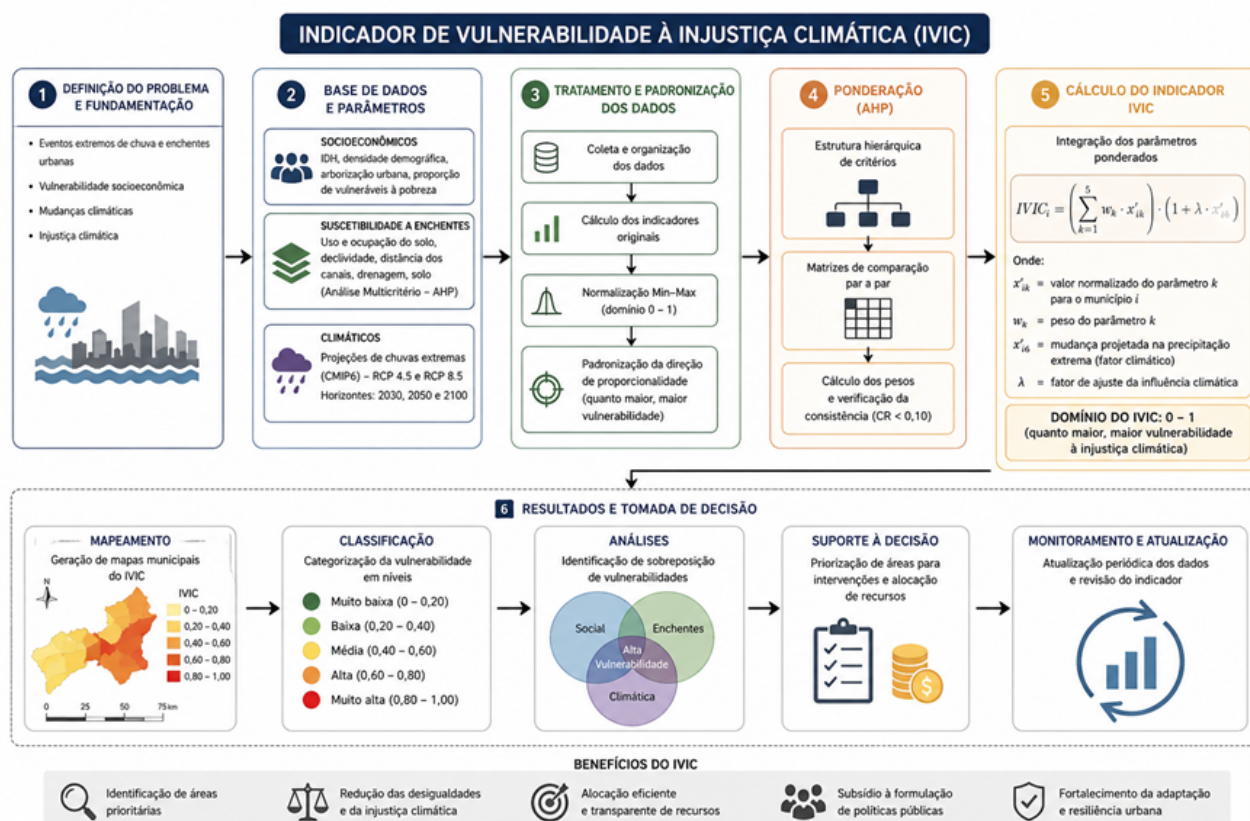


Figura 1 – Fluxograma da Metodologia – Visualização esquemática da metodologia em blocos

A formulação do Indicador de Vulnerabilidade à Injustiça Climática foi realizada por meio da integração das três componentes avaliadas. A ponderação dos parâmetros foi conduzida mediante aplicação do Processo Analítico Hierárquico (AHP), conferindo maior importância relativa àqueles mais representativos da vulnerabilidade e dificuldade de recuperação após eventos extremos de precipitação.

Todos os parâmetros foram normalizados no domínio [0, 1], garantindo comparabilidade e evitando distorções na integração. Assim, o IVIC assume valores contínuos nesse domínio. Os valores mais elevados indicam maior vulnerabilidade à injustiça climática. A formulação do IVIC está apresentada na Equação 1.

$$IVIC_i = \left(\sum_{k=1}^5 w_k x'_{ik} \right) \cdot (1 + \lambda \cdot x'_{i6}) \quad (1)$$

Na Equação 2, o termo x'_{ik} representa o valor do parâmetro k para o município i . Por sua vez, o valor x'_{ik} é o valor normalizado de x_{ik} , obtido a partir dos valores máximos e mínimos associados ao parâmetro k no conjunto de municípios analisados e da direção de proporcionalidade do parâmetro em relação à vulnerabilidade à injustiça climática. O primeiro fator da equação

corresponde à componente socioeconômica-territorial, resultante da soma ponderada dos parâmetros: área com Indicador de Suscetibilidade a Enchentes igual ou superior a 0,8 ($w_1 = 0,26$), Índice de Desenvolvimento Humano municipal ($w_2 = 0,12$), densidade demográfica ($w_3 = 0,20$), arborização de vias públicas ($w_4 = 0,12$) e proporção de vulneráveis à pobreza ($w_5 = 0,30$).

O amplificador climático teve seu coeficiente λ fixado em 0,5. O parâmetro x'_{i6} refere-se à Intensificação Projetada de Chuvas Extremas, incorporando ao modelo a dimensão associada ao agravamento de eventos pluviométricos extremos conforme apresentado em Lopes et al. (2026).

A componente socioeconômica do IVIC foi constituída a partir de variáveis extraídas de bases de dados públicas nacionais, notadamente o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) e o Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (Ipea). Em escala municipal, foram selecionadas as variáveis proporção de vulneráveis à pobreza (%), densidade demográfica (hab/km²), arborização de vias públicas (%) e IDH municipal (adimensional), que contemplam atributos representativos da vulnerabilidade social e da capacidade de recuperação após um evento extremo de chuva.

Diante da indisponibilidade de dados hidrológicos municipais que permitissem a identificação direta de áreas susceptíveis a enchentes, foi utilizado uma abordagem indireta. O índice de susceptibilidade a enchentes foi construído mediante Análise de Decisão Multicritério (MCDA) com ponderação pelo Processo Analítico Hierárquico (AHP), e incorporou as variáveis Índice Topográfico de Umidade (TWI, peso 0,46), declividade (peso 0,26), elevação (peso 0,11) e classificação de uso e ocupação do solo (LULC, peso 0,17). Esses parâmetros foram normalizados no domínio [0, 1], integrados por soma ponderada, resultando em um Indicador de Suscetibilidade a Enchentes (Equação 2) estratificado em cinco categorias de susceptibilidade. Desse modo, o IVIC incorporou o parâmetro denominado “área com muito alta susceptibilidade a enchentes” (km²), definido como a extensão territorial total do município cujo valor de ISE (Equação 2) atingiu ou excedeu o limiar de 0,8. Os dados utilizados para a construção do ISE utilizou base de dados de satélite com resolução espacial de 30 metros.

$$ISE = 0,46 \cdot TWI + 0,26 \cdot D + 0,11 \cdot E + 0,17 \cdot LULC \quad (2)$$

A componente climática foi estruturada mediante análise estatística comparativa entre uma série histórica de precipitação diária (1961-2024), da base de Xavier *et al.* (2022), e projeções

futuras (2024-2099) do Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6), acessadas pela plataforma CLIMBra de Ballarin *et al.* (2023). Para o desenvolvimento deste trabalho, foi utilizado o modelo HadGEM3-GC31-LL, no cenário SSP2-4.5. A partir disso, desenvolveu-se um parâmetro denominado Intensificação Projetada de Chuvas Extremas, o qual foi incorporado ao IVIC. A metodologia que apresenta a integração das mudanças climáticas na composição do IVIC está apresentada em Lopes et al. (2026).

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A metodologia proposta foi aplicada aos municípios da região da bacia do Rio Sorocaba e Médio Tietê. A Tabela 1 apresenta o resultado do indicador para cada município.

Tabela 1 - Resultado do IVIC para os municípios da Bacia do Rio Sorocaba e Médio Tietê.

Cidade	Sinal	Cidade	Sinal	Cidade	Sinal
Alambari	0,57	Guareí	0,55	Pirapora do Bom Jesus	0,48
Alumínio	0,37	Ibiúna	0,52	Porangaba	0,41
Anhembi	0,54	Igaraçu do Tietê	0,34	Porto Feliz	0,31
Araçariguama	0,37	Indaiatuba	0,16	Quadra	0,60
Araçoiaba da Serra	0,31	Iperó	0,48	Rafard	0,24
Barra Bonita	0,14	Itapetininga	0,74	Rio das Pedras	0,23
Bofete	0,49	Itapevi	0,75	Saltinho	0,24
Boituva	0,22	Itu	0,30	Salto	0,22
Botucatu	0,42	Jumirim	0,17	Salto de Pirapora	0,21
Cabreúva	0,42	Jundiaí	0,23	Santana de Parnaíba	0,24
Cajamar	0,42	Laranjal Paulista	0,31	São Manuel	0,43
Capela do Alto	0,47	Mairinque	0,31	São Roque	0,28
Capivari	0,24	Mineiros do Tietê	0,24	Sarapuí	0,68
Cerquilha	0,10	Mombuca	0,37	Sorocaba	0,46
Cesário Lange	0,40	Pardinho	0,34	Tatuí	0,38
Conchas	0,32	Pereiras	0,38	Tietê	0,23

Cotia	0,40	Piedade	0,65	Torre de Pedra	0,39
Dois Córregos	0,45	Pilar do Sul	0,58	Vargem Grande Paulista	0,32
Elias Fausto	0,28	Piracicaba	0,42	Votorantim	0,37

Os resultados estão disponíveis em lamar-league.com.br (LAMAR, 2026), uma plataforma digital interativa, concebidos para facilitar a visualização multidimensional dos parâmetros mensurados e da vulnerabilidade à injustiça climática, bem como para apoiar processos de tomada de decisão baseados em evidências científicas. A Figura 2 ilustra o resultado do IVIC associado aos pontos de intervenções do FEHIDRO.

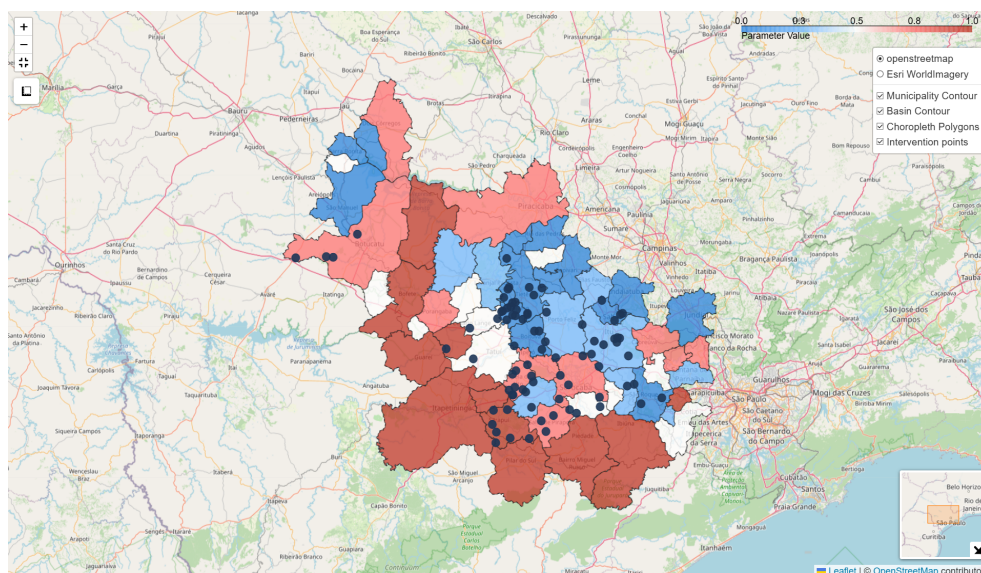


Figura 2 - Visualização geoespacializada do Indicador de Vulnerabilidade a Injustiça Climática.

A análise da distribuição espacial da suscetibilidade a enchentes evidencia a necessidade de intervenção em amplos recortes territoriais, com 12 municípios apresentando indicadores de suscetibilidade próximos da unidade. Em paralelo, o mapeamento da vulnerabilidade à pobreza revelou padrões espaciais demarcados, com municípios de maior vulnerabilidade socioeconômica agrupados territorialmente.

Em virtude da indisponibilidade de dados hidrológicos em escala municipal que permitissem a quantificação direta de ocorrências de inundações e alagamentos e, consequentemente, identificação de áreas suscetíveis a enchentes, operacionalizou-se a componente de suscetibilidade a enchentes mediante a construção de um indicador intermediário (ISE). Ademais, reconhece-se como limitação metodológica a aplicação inicial de apenas um modelo de projeção climática do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC) e um único cenário de trajetória de

emissões de gases de efeito estufa (GEE), o que confere aos resultados um caráter preliminar e prototípico, sujeito a refinamentos em etapas subsequentes de pesquisa e de implementação junto à órgãos tomadores de decisão.

5. CONCLUSÃO

Este trabalho teve como objetivo propor uma metodologia para a construção de um indicador integrado, destinado à avaliação da vulnerabilidade a enchentes urbanas sob a perspectiva da justiça climática, denominado Indicador de Vulnerabilidade à Injustiça Climática (IVIC). Os resultados demonstraram que a abordagem proposta permite identificar desigualdades espaciais na exposição e capacidade de resposta, destacando áreas prioritárias para intervenção. Como principal contribuição, o estudo integra variáveis hidrológicas, socioeconômicas e de infraestrutura para subsidiar a tomada de decisão na gestão urbana de riscos. Como limitação, destaca-se a disponibilidade e resolução dos dados. Como trabalhos futuros, propõe-se a ampliação do indicador para outras regiões e a incorporação de múltiplos resultados dos cenários de mudanças climáticas.

AGRADECIMENTOS

Os autores expressam seus agradecimentos à Liga de Adaptação às Mudanças Ambientais e Resiliência (LAMAR), cujo ambiente científico e colaborativo foi fundamental para a concepção e o desenvolvimento deste trabalho. A atuação da Liga, ao promover a integração entre ensino, pesquisa e extensão, constituiu um elemento central para a formação do grupo de pesquisadores responsável pela execução deste projeto.

REFERÊNCIAS

- ARAOS, M. et al. Climate change adaptation planning in large cities. *Global Environmental Change*, v. 40, p. 1–13, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2016.06.009>.
- BALLARIN, A. S. et al. CLIMBra - Climate Change Dataset for Brazil. *Scientific Data*, v. 10, p. 47, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41597-023-01956-z>.
- BIGI, V. et al. Flood vulnerability analysis in urban context: a socioeconomic sub-indicators overview. *Climate*, v. 9, n. 1, p. 12, 2021. DOI: 10.3390/cli9010012.

BLÖSCHL, G. et al. Changing climate shifts timing of European floods. *Nature*, v. 573, p. 108–111, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41586-019-1495-6>.

CUTTER, S. L.; BORUFF, B. J.; SHIRLEY, W. L. Social vulnerability to environmental hazards. *Social Science Quarterly*, v. 84, n. 2, p. 242–261, 2003.

DE BRITO, M. M. et al. Urban flood vulnerability assessment: a comprehensive review. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, v. 27, p. 22–35, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2017.10.004>.

EYRING, V. et al. Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6). *Geoscientific Model Development*, v. 9, p. 1937–1958, 2016. DOI: <https://doi.org/10.5194/gmd-9-1937-2016>.

FOWLER, H. J. et al. Anthropogenic intensification of short-duration rainfall extremes. *Nature Reviews Earth & Environment*, v. 2, p. 107–122, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1038/s43017-020-00128-6>.

HALLEGATTE, S.; GREEN, C.; NICHOLLS, R. J.; CORFEE-MORLOT, J. Future flood losses in major coastal cities. *Nature Climate Change*, v. 3, p. 802–806, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1038/nclimate1979>.

IPCC. Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2022. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg2/>.

KAZAKIS, N.; KOUKIS, G.; PAVLIDES, S. Flood hazard mapping and vulnerability assessment using GIS and multicriteria analysis. *Environmental Earth Sciences*, v. 74, p. 413–423, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12665-015-4064-2>.

LAMAR. Plataforma de Monitoramento da Vulnerabilidade à Injustiça Climática. 2026. Disponível em: <https://lamar-league.com.br/>. Acesso em: 23 abr. 2026.

LOPES, C. A. et al. (2026). “Mudanças Climáticas e Segregação Socioespacial: um indicador integrado para a bacia do Rio Sorocaba” in Anais do XVI Encontro Nacional de Águas Urbanas, São Carlos, Set. 2026.

MEEROW, S.; NEWELL, J. P.; STULTS, M. Defining urban resilience. *Landscape and Urban Planning*, v. 147, p. 38–49, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2015.11.011>.

MOREIRA, L. F.; BRITO, M. M.; KOBİYAMA, M. Flood risk assessment in urban areas: a review. *Water*, v. 13, n. 5, p. 1–20, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/w13050686>.

O'NEILL, B. C. et al. The Scenario Model Intercomparison Project (ScenarioMIP) for CMIP6. *Geoscientific Model Development*, v. 9, p. 3461–3482, 2016. DOI: <https://doi.org/10.5194/gmd-9-3461-2016>.

PAINTER, M. A. Social vulnerability index. *Natural Hazards*, v. 120, n. 8, p. 7265–7292, 2024. DOI: 10.1007/s11069-023-06378-z.

VON SZOMBATHÉLY, M. et al. Social vulnerability index. *International Journal of Disaster Risk Science*, v. 14, p. 604–621, 2023.

WESTRA, S. et al. Future changes to the intensity and frequency of short-duration extreme rainfall. *Reviews of Geophysics*, v. 52, n. 3, p. 522–555, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1002/2014RG000464>.

WINSEMIUS, H. C. et al. Global drivers of future river flood risk. *Nature Climate Change*, v. 6, p. 381–385, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1038/nclimate2893>.

XAVIER, A. C.; SCANLON, B. R.; KING, C. W.; ALVES, A. I. (2022). New improved Brazilian daily weather gridded data (1961–2020). *International Journal of Climatology*, v. 42, n. 16, p. 8390–8404, jun. 2022. Wiley. <http://dx.doi.org/10.1002/joc.7731>.