

SISTEMA DE SUPORTE À DECISÃO PARA MINIMIZAÇÃO DA VULNERABILIDADE A INJUSTIÇA CLIMÁTICA EM ENCHENTES URBANAS

*Aline Aikawa Assato¹ ; Giovanna Maciel Baudenbacher¹ ; Maria Eduarda Pierami¹ ; William
Dantas Vichete¹*

RESUMO – A intensificação de eventos hidrológicos extremos, associada às mudanças climáticas e à urbanização desordenada, tem ampliado os impactos de enchentes e evidenciado desigualdades socioespaciais nas cidades, tornando sua gestão um desafio central. Nesse contexto, este trabalho propõe um Sistema de Suporte à Decisão (SSD) integrado a um indicador de vulnerabilidade à injustiça climática associado, com o objetivo de identificar áreas urbanas mais suscetíveis que podem subsidiar a tomada de decisão no desenvolvimento sustentável de cidades. Foi estruturado um framework de Sistema de Suporte à Decisão (SSD) que integra variáveis hidrológicas, socioeconômicas e de infraestrutura, aliada a um modelo de otimização sob restrição orçamentária para alocação eficiente e equitativa de recursos financeiros. Os resultados indicam que o SSD proposto permite reduzir as assimetrias, além de identificar áreas prioritárias e otimizar a distribuição de investimentos. Esta abordagem contribui para o aprimoramento da gestão de drenagem urbana, promovendo decisões mais eficientes e orientadas pela justiça climática.

Palavras-Chave: Sustentabilidade, Mudança Climática, Adaptação.

ABSTRACT– The intensification of extreme hydrological events, coupled with climate change and unplanned urbanization, has amplified flood impacts and highlighted socio-spatial inequalities in cities, making urban management a central challenge. In this context, this study proposes a Decision Support System (DSS) integrated with a climate injustice vulnerability indicator to identify the most susceptible urban areas and support decision-making for sustainable urban development. A DSS framework was structured by integrating hydrological, socioeconomic, and infrastructure variables, combined with an optimization model under budget constraints for the efficient and equitable allocation of financial resources. The results indicate that the proposed DSS enables the reduction of asymmetries, identifies priority areas, and optimizes investment distribution. This approach contributes to the improvement of urban drainage management, promoting more efficient decisions guided by climate justice.

Key-words: Sustainability, Climate Change, Adaptation.

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: sg.icts@unesp.br.

1. INTRODUÇÃO

A crise climática global tem intensificado a frequência e a magnitude de eventos hidrológicos extremos, transformando a gestão de enchentes urbanas em um dos maiores desafios para a governança das cidades no século XXI. No Brasil, projeções recentes indicam que o aumento da temperatura global resultará em alterações dos padrões de precipitação intensas, particularmente nas regiões Sul e Sudeste, intensificando os riscos de inundações e alagamentos em áreas densamente urbanizadas (Dantas et al., 2025; Bains et al., 2022). Este cenário é agravado por processos históricos de urbanização desordenada, que resultaram em alta impermeabilização do solo e ocupação de áreas de preservação permanente (Ballarin et al., 2023; Jacobi; Sulaiman, 2016).

Historicamente, as estratégias de adaptação e mitigação de riscos de enchentes têm sido dominadas por uma perspectiva técnico-centrada, focada na construção de infraestruturas cinzas e na proteção de ativos econômicos de alto valor (Meerow et al., 2019). No entanto, tal abordagem frequentemente negligencia as dimensões sociais do risco e a distribuição desigual dos impactos climáticos (Sultana, 2022). A justiça climática emerge como um pilar essencial para o planejamento urbano, onde a vulnerabilidade não é apenas uma função da proximidade física ao perigo, mas o produto de desigualdades estruturais que limitam a capacidade de resposta e recuperação das populações marginalizadas (Shi et al., 2016).

A literatura sobre vulnerabilidade a inundações tem evoluído significativamente com o desenvolvimento de índices multidimensionais que integram variáveis socioeconômicas e ambientais (Cutter et al., 2003). Estudos demonstram que fatores como renda baixa, precariedade habitacional, falta de saneamento básico e mobilidade reduzida estão sistematicamente associados a uma maior exposição e sensibilidade aos desastres (Bigi et al., 2021; Moreira et al., 2021). No entanto, apesar do avanço científico, persiste uma lacuna crítica: a dificuldade de operacionalizar esses conceitos em ferramentas práticas de suporte à decisão (Sistemas de Suporte à Decisão - SSD) que possam ser integradas ao ciclo de planejamento público.

Os SSDs existentes frequentemente falham em incorporar mecanismos explícitos de justiça e em lidar com a alta resolução espacial necessária para capturar a heterogeneidade intraurbana da injustiça climática (Mohtat; Khirfan, 2022). Além disso, a integração de cenários futuros de mudanças climáticas em modelos de decisão operacional ainda é rara, o que compromete a longevidade e a eficácia das intervenções (Asadzadeh et al., 2023).

Diante deste cenário, este estudo propõe o desenvolvimento de um indicador integrado e de uma plataforma de suporte à decisão orientada para a minimização da vulnerabilidade climática. Esse framework busca preencher a lacuna entre o diagnóstico científico e a priorização de ações, integrando dados hidrológicos de extremos, variáveis de infraestrutura e indicadores de justiça distributiva. O objetivo central é fornecer aos gestores urbanos uma ferramenta que explicita as trocas (trade-offs) entre eficiência técnica e equidade social, permitindo uma alocação de recursos que reduza sistematicamente as desigualdades territoriais frente ao risco de enchentes urbanas.

Este trabalho justifica-se pela urgência de repensar as políticas de drenagem urbana sob a ótica da justiça, especialmente em regiões metropolitanas de alta complexidade como a bacia do Rio Sorocaba. Este estudo pretende demonstrar como a análise da vulnerabilidade socioespacial pode transformar a gestão de desastres, movendo-a de uma resposta reativa para uma estratégia de adaptação proativa e socialmente justa.

2. OBJETIVOS

Propor um framework conceitual de um Sistema de Suporte à Decisão (SSD), que integra a projeção de mudanças nos padrões de precipitação, risco hidrológico e vulnerabilidade socioespacial, com foco na identificação e priorização de áreas sujeitas à injustiça climática em ambientes urbanos. Esse artigo tem como objetivo contribuir para o avanço de abordagens integradas que incorporem equidade e adaptação climática na gestão de drenagem e manejo de águas pluviais.

3. METODOLOGIA

3.1 Área de Estudo e Escala de Análise

O estudo abrange as sedes urbanas dos municípios pertencentes à Bacia do Rio Sorocaba, área caracterizada por intensos processos de expansão urbana e vulnerabilidade hídrica (Alves et al., 2021; Bosco; Valverde, 2022). A escolha desta escala permite capturar as disparidades socioespaciais que muitas vezes são diluídas em análises municipais agregadas, possibilitando a identificação de *hotspots* de risco no interior das cidades.

3.2 Sistema de Suporte à Decisão (SSD)

Para que o resultado da abordagem metodológica seja implementado em um SSD para alocação de recursos, é importante transformar o Indicador de Vulnerabilidade à Injustiça Climática (J_i) em priorização ótima sob restrição orçamentária (Baudenbacher *et al.*, 2026). Seja $x_{im} \in \{0, 1\}$ (ou contínuo $[0, 1]$) indicando investimento em medida m na unidade i (recorte territorial). A otimização poderá representar os efeitos esperados da redução da variação do índice ΔJ_{im} (ou devido a redução das ameaças hidrológicas H , da exposição E , da vulnerabilidade social V e da capacidade adaptativa C). Considerando uma forma linearizada:

$$J_i(x) = J_i - \sum_m \Delta J_{im} x_{im}$$

Quando se tem um orçamento previsto total B , uma forma simplificada seria minimizar a injustiça total ponderada:

$$\min \sum_{i=1}^N w_i J_i(x)$$

sujeito a restrição onde a soma dos investimentos sejam iguais ou inferior ao recurso total disponível:

$$\sum_{i=1}^N \sum_{m=1}^M c_{im} x_{im} \leq B ; x_{im} \in \{0, 1\} \text{ ou } [0, 1]$$

Onde: w_i é o peso ponderado; J_i é o indicador de Vulnerabilidade a Injustiça climática; x é o valor entre 0 e 1 do indicador de recorte territorial i ; N é o conjunto de unidades territoriais da área em estudo; M é o investimento para o recorte territorial i . O peso w_i privilegia a população exposta, definido como $w_i = 1 + \kappa \cdot \text{Pop}_i$.

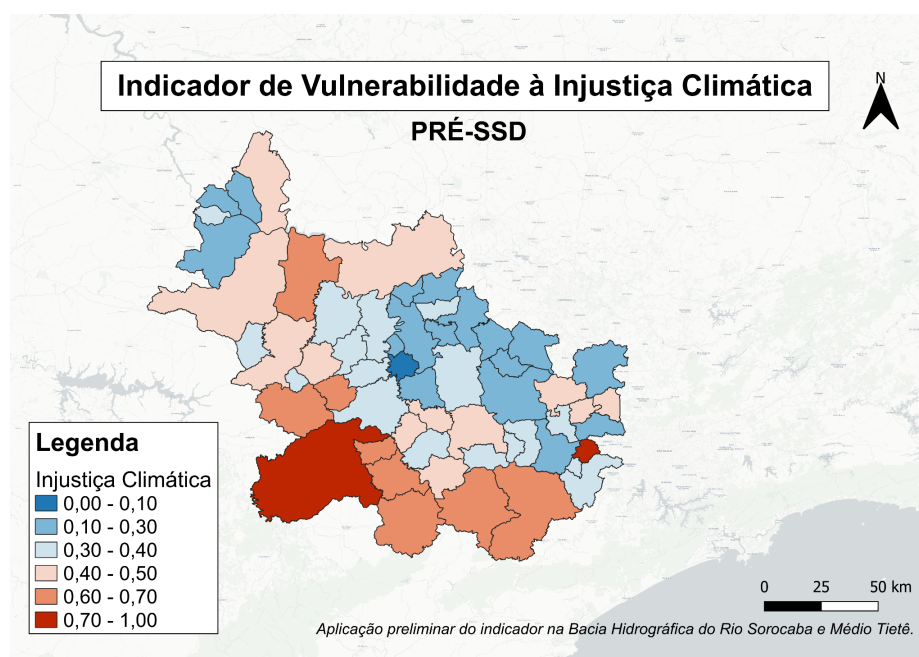
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados apresentados correspondem a um cenário projetado, obtido por meio de simulação numérica com base no *framework* proposto. Diferentemente de uma condição média inicial, o valor de 0,45 representa o valor máximo do índice de injustiça climática após a intervenção, ou seja, o limite superior alcançado nas unidades mais críticas após a aplicação do Sistema de Suporte à Decisão (SSD).

No cenário inicial (pré-intervenção), a distribuição espacial do índice evidenciava elevada heterogeneidade, com a presença de *hotspots* de injustiça climática caracterizados por valores superiores, associados à combinação de exposição hidrológica, precariedade de infraestrutura e maior vulnerabilidade socioeconômica. Esses resultados reforçam a concentração desigual do risco em áreas urbanas mais fragilizadas.

A simulação da aplicação do SSD, sob uma restrição orçamentária (B), promove a alocação otimizada de recursos com base na razão benefício-custo e na ponderação pela população exposta. Como resultado, observou-se uma redução expressiva dos valores mais elevados do índice, de modo que os recortes territoriais anteriormente mais críticos tiveram seus níveis do indicador de vulnerabilidade à injustiça climática reduzidos até o patamar alvo de 0,45. Esse comportamento indica que o modelo foi capaz de atenuar os extremos da distribuição, reduzindo as assimetrias entre áreas vulneráveis.

Por se tratar de um teste hipotético da metodologia, os resultados representam um cenário de redução da injustiça climática, evidenciando o potencial do SSD como ferramenta de apoio à decisão. Ainda assim, o fato de os valores máximos terem sido reduzidos até 0,45 demonstra a capacidade do modelo em mitigar desigualdades extremas e orientar intervenções equitativas no contexto da gestão de enchentes urbanas. A Figura 1 ilustra a visualização do resultado antes e após a otimização de recursos para minimizar a injustiça climática frente às enchentes urbanas.



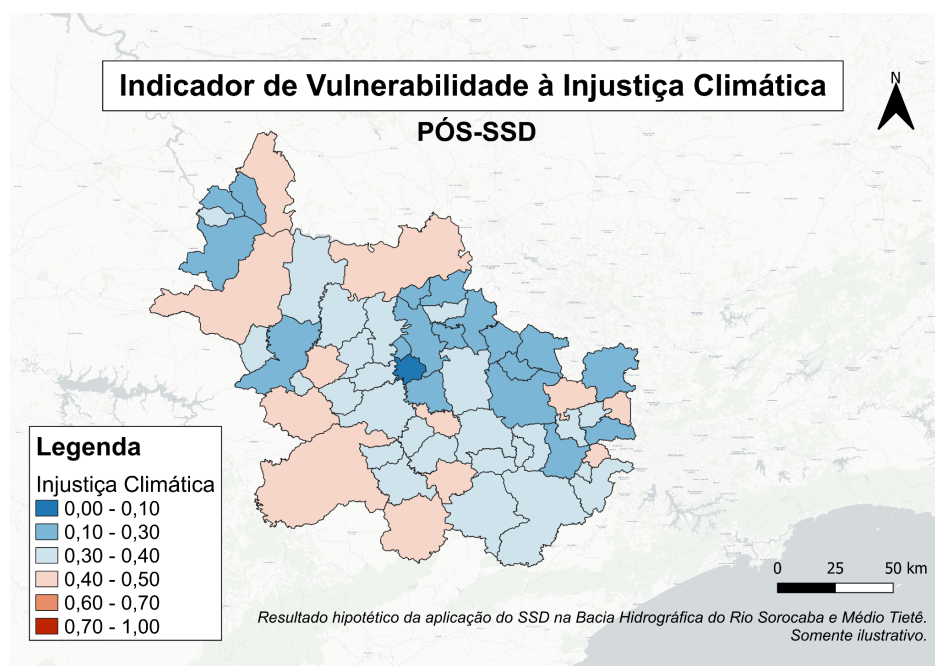


Figura 1. Resultado do Indicador de Vulnerabilidade a Injustiça Climática antes e depois do SSD.

5. CONCLUSÃO

Este trabalho teve como objetivo apresentar um SSD integrado para avaliação da vulnerabilidade a enchentes urbanas sob a perspectiva da justiça climática. 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 em um sistema de suporte à decisão aplicável à gestão urbana. Como limitação, destaca-se a dependência de disponibilidade e qualidade dos dados. Como trabalhos futuros, propõe-se a ampliação da aplicação do indicador para outras regiões e a incorporação de cenários de mudanças climáticas.

REFERÊNCIAS

- ALVES, P. B. R.; DJORDJEVIĆ, S.; JAVADI, A. A. Understanding the needs for acting: an integrated framework for applying nature-based solutions in Brazil. *Water Science & Technology*, London, v. 85, n. 4, p. 987–1002, 2021. DOI: 10.2166/wst.2021.513.
- ASADZADEH, A. et al. Capacitating urban governance and planning systems to drive transformative resilience. *Sustainable Cities and Society*, Amsterdam, v. 96, p. 104637, 2023. DOI: 10.1016/j.scs.2023.104637.
- BALLARIN, A. S. et al. CLIMBra – Climate change dataset for Brazil. *Scientific Data*, London, v. 10, p. 47, 2023. DOI: 10.1038/s41597-023-01956-z.

BAINY, B. K.; ÁVILA, A. M. H.; SILVA, P. H. Chuvas intensas e ocorrência de alagamentos. *Labor & Engenho*, Campinas, v. 16, 2022. DOI: 10.20396/labore.v16i00.8667944.

BAUDENBACHER, G. M. et al. Indicador de vulnerabilidade à injustiça climática frente a enchentes urbanas. São Carlos, ENAU, 2026.

BIGI, V. et al. Flood vulnerability analysis in urban context: a socioeconomic sub-indicators overview. *Climate*, Basel, v. 9, n. 1, p. 12, 2021. DOI: 10.3390/cli9010012.

BOSCO, R. B.; VALVERDE, M. C. Projeções climáticas de precipitação e temperatura na Região Metropolitana do Vale do Paraíba – SP simulados por modelos climáticos do CMIP6. *Revista Brasileira de Geografia Física*, Recife, v. 15, n. 3, p. 1621–1638, 2022. DOI: 10.26848/rbgf.v15.3.p1621-1638.

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.

DANTAS, L. G. et al. Projections of extreme weather events in Brazil. *Climatic Change*, Dordrecht, v. 178, n. 8, 2025. DOI: 10.1007/s10584-025-03989-2.

JACOBI, P. R.; SULAIMAN, S. N. Governança ambiental urbana. *Revista USP*, São Paulo, n. 109, p. 133–142, 2016. DOI: 10.11606/issn.2316-9036.v0i109p133-142.

KENNEY, M. A.; JANETOS, A. C. National indicators of climate vulnerability. *Climatic Change*, Dordrecht, v. 163, n. 4, p. 1695–1714, 2020. DOI: 10.1007/s10584-020-02939-4.

MEEROW, S. et al. Social equity in urban resilience planning. *Local Environment*, London, v. 24, n. 9, p. 793–?, 2019. DOI: 10.1080/13549839.2019.1645103.

MOHTAT, N.; KHIRFAN, L. Distributive justice and urban form adaptation to flooding risks; Spacial analysis to identify Toronto's priority neighborhoods.. *Frontiers in Sustainable Cities*, v. 4, 2022.

MOREIRA, L. L. et al. Flood vulnerability indices. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, Göttingen, v. 21, p. 1513–1530, 2021. DOI: 10.5194/nhess-21-1513-2021.

SHI, L. et al. Roadmap towards justice in urban climate adaptation research. *Nature Climate Change*, v. 6, n. 2, p. 131–137, 2016. DOI: 10.1038/nclimate2841.

SULTANA, F. Critical climate justice. *The Geographical Journal*, v. 188, n. 1, p. 118–124, 2022. DOI: 10.1111/geoj.12417.