CONFIABILIDADE DE FERRAMENTAS DE MENSURAÇÃO DA RESILIÊNCIA HIDROCLIMÁTICA PARA APOIO À GESTÃO DE RISCOS

Jéssica Aurora Bernardo 1 [1]; Patrícia Kazue Uda [2] & Alexandra Rodrigues Finotti [3]

Palavras-Chave – Validação; Ferramentas de mensuração; Resiliência hidroclimática urbana.

INTRODUÇÃO

O aumento da frequência e da intensidade dos eventos hidroclimáticos extremos tem ampliado a necessidade de ferramentas capazes de subsidiar o planejamento territorial, a adaptação climática e a gestão do risco de desastres (BERTILSSON et al., 2019). Nesse contexto, ferramentas de mensuração da resiliência hidroclimática vêm sendo amplamente desenvolvidas para sintetizar informações multidimensionais em medidas capazes de avaliar a capacidade dos territórios de resistir, adaptar-se e recuperar-se frente aos impactos desses eventos (SATOUR et al., 2021). Além de permitir diagnósticos comparativos entre diferentes localidades, essas ferramentas têm sido utilizadas para apoiar a definição de prioridades de investimento, orientar políticas públicas e monitorar estratégias de fortalecimento da resiliência (REZENDE et al., 2019).

Entretanto, a utilidade desses instrumentos depende não apenas da consistência de sua fundamentação conceitual ou da sofisticação dos procedimentos empregados em sua construção, mas também da existência de evidências de que os resultados produzidos representam adequadamente o fenômeno que se propõem a mensurar (HOCHRAINER-STIGLER et al., 2025). Nesse sentido, a validação constitui uma etapa essencial no desenvolvimento de ferramentas de mensuração, reunindo procedimentos destinados a verificar sua robustez, consistência e confiabilidade, de modo a assegurar que seus resultados possam subsidiar, com segurança, processos de tomada de decisão (AROCA-JIMÉNEZ et al., 2023).

Apesar do crescimento da produção científica de índices, frameworks, sistemas de apoio à decisão e modelos voltados à mensuração da resiliência hidroclimática urbana, ainda não existe consenso acerca das estratégias empregadas para validar essas ferramentas, nem sobre a suficiência das evidências produzidas para sustentar sua aplicação na gestão de riscos e desastres (FELDMEYER et al., 2020). Embora diferentes procedimentos de auditoria metodológica tenham sido incorporados à literatura, a ausência de protocolos sistemáticos de validação e a heterogeneidade das abordagens utilizadas dificultam a avaliação da confiabilidade dessas ferramentas e de sua efetiva aplicabilidade como instrumentos de apoio ao planejamento territorial (AROCA-JIMÉNEZ et al., 2023).

Diante desse contexto, o presente trabalho tem como objetivo avaliar criticamente as estratégias de validação empregadas em ferramentas de mensuração da resiliência hidroclimática urbana, discutindo suas implicações para a confiabilidade desses instrumentos como suporte à gestão de riscos e desastres.

METODOLOGIA

Este estudo consiste em um recorte de uma revisão sistemática da literatura conduzida conforme as recomendações do Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses (PRISMA),

1) Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina. jessicaaurorabernardo@gmail.com
2) Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina. patricia.kazue@ufsc.br
3) Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina. alexandra.finotti@ufsc.br

cujo protocolo foi previamente registrado na plataforma Open Science Framework (OSF; DOI: 10.17605/OSF.IO/5U6GR). As buscas foram realizadas nas bases Scopus, Web of Science e SciELO, utilizando estratégias estruturadas para identificar ferramentas de mensuração da resiliência hidroclimática aplicáveis ao contexto urbano.

Foram incluídos estudos originais publicados entre 2014 e 2025, em português e inglês, que apresentassem índices compostos, frameworks, sistemas de apoio à decisão ou modelos estruturados destinados à avaliação da resiliência hidroclimática urbana. Após as etapas de identificação, remoção de duplicatas, triagem e elegibilidade, a amostra final foi composta por 84 estudos.

Para o presente trabalho, foi realizada uma análise específica da categoria validação metodológica, extraída durante o processo de revisão. As estratégias de validação foram classificadas conforme sua finalidade e natureza das evidências empregadas, distinguindo-se abordagens de auditoria interna (robustez paramétrica e consistência estatística), auditoria externa (validação comparativa e validação empírica), validação múltipla e ausência de procedimentos formais de validação. A síntese dos resultados foi realizada por meio de estatística descritiva e análise qualitativa das abordagens metodológicas identificadas.

RESULTADOS

A análise dos 84 estudos evidenciou que a validação permanece uma das etapas menos consolidadas na construção de ferramentas de mensuração da resiliência hidroclimática urbana (Figura 1). A ausência de qualquer procedimento formal de validação foi identificada em 61,90% das ferramentas analisadas (n = 52), indicando que a maioria dos estudos propõe índices, frameworks ou modelos sem apresentar evidências capazes de demonstrar que os resultados produzidos representam adequadamente a resiliência dos territórios avaliados.

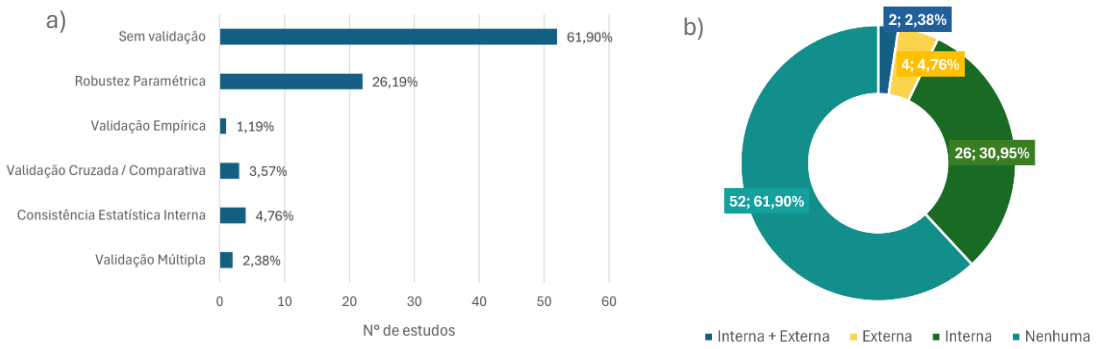


Figura 1. Distribuição das abordagens de validação identificadas nos estudos analisados: (a) classificação metodológica das estratégias de validação; (b) natureza das evidências de validação empregadas. Fonte: autoria própria (2026).

Entre as ferramentas que realizaram algum procedimento de validação, predominaram amplamente as estratégias de auditoria interna, correspondendo a 30,95% da amostra (n = 26). Nesse grupo destacaram-se as análises de robustez paramétrica (26,19%; n = 22), baseadas principalmente em análises de sensibilidade, simulações de Monte Carlo, decomposição de variância e perturbações controladas dos parâmetros do modelo. Em menor frequência (4,76%; n = 4), foram empregados procedimentos de consistência estatística interna, como Alfa de Cronbach, KMO, teste de Bartlett e medidas de validade convergente e discriminante. Embora esses métodos contribuam para verificar a estabilidade matemática e a coerência interna das ferramentas, eles não demonstram, isoladamente, que o índice representa adequadamente as condições reais de resiliência do território.

Em contraste, as estratégias de auditoria externa mostraram-se pouco frequentes (4,76%; n = 4). A validação comparativa foi identificada em apenas três estudos (3,57%), enquanto somente um estudo (1,19%) realizou validação empírica mediante comparação direta entre os resultados do índice e evidências observadas de impactos decorrentes de eventos de inundação. A combinação entre auditorias internas e externas, classificada neste trabalho como validação múltipla, foi identificada em apenas dois estudos (2,38%), representando a abordagem metodológica mais robusta observada na literatura.

Um aspecto relevante identificado durante a análise foi a recorrente utilização de métricas de desempenho provenientes de modelos de aprendizado de máquina, como ROC/AUC, RMSE, *Accuracy* e F1-score. Em diversos estudos, entretanto, essas métricas foram aplicadas exclusivamente à validação de modelos auxiliares empregados na construção dos índices, como modelos de suscetibilidade, classificação ou predição hidrológica, e não à ferramenta de mensuração da resiliência propriamente dita. Essa distinção evidencia que o elevado desempenho computacional de modelos auxiliares não constitui, por si só, evidência de validade do índice de resiliência produzido.

A evolução temporal das estratégias de validação demonstra que, embora tenha ocorrido crescimento das auditorias internas a partir de 2023, impulsionado principalmente por análises de robustez e sensibilidade, esse avanço não foi acompanhado pelo fortalecimento das validações externas e empíricas, que permanecem excepcionais na literatura. Como consequência, a evolução metodológica observada nas etapas de construção dos índices não foi acompanhada por igual avanço na produção de evidências capazes de sustentar sua confiabilidade para aplicação no planejamento territorial e na gestão de riscos e desastres.

CONCLUSÕES

Os resultados evidenciam que, embora as ferramentas de mensuração da resiliência hidroclimática tenham evoluído significativamente em sua estrutura conceitual e em seus procedimentos de construção, a validação permanece uma das etapas menos consolidadas desse processo. Predominam estratégias voltadas à verificação da consistência interna e da robustez matemática dos modelos, enquanto procedimentos capazes de demonstrar a aderência das ferramentas às condições observadas nos territórios ainda são pouco frequentes. Além disso, verificou-se que parte da literatura utiliza métricas de desempenho de modelos hidrológicos, estatísticos ou de inteligência artificial como evidências de validação, embora essas avaliações se refiram aos modelos auxiliares empregados na construção das ferramentas e não, necessariamente, à capacidade do instrumento final de representar a resiliência hidroclimática.

Esses resultados indicam que o avanço metodológico observado na construção de ferramentas de mensuração não foi acompanhado por um desenvolvimento equivalente das estratégias de validação, limitando a confiabilidade desses instrumentos para subsidiar o planejamento territorial e a gestão de riscos e desastres. Nesse contexto, o fortalecimento de protocolos de validação, especialmente aqueles baseados em evidências empíricas e na combinação de múltiplas estratégias de auditoria

metodológica, constitui uma etapa essencial para ampliar a credibilidade, a comparabilidade e a aplicabilidade dessas ferramentas no suporte à tomada de decisão.

REFERÊNCIAS

AROCA-JIMÉNEZ, E.; BODOQUE, J. M.; GARCÍA, J. A. (2023). "An Integrated Multidimensional Resilience Index for Urban Areas Prone to Flash Floods: Development and Validation". *Science of the Total Environment*, v. 894, p. 164935.

BERTILSSON, L.; WIKLUND, K.; TEBALDI, I. M.; REZENDE, O. M.; VERÓL, A. P.; MIGUEZ, M. G. (2019). "Urban Flood Resilience – A Multi-Criteria Index to Integrate Flood Resilience into Urban Planning". *Journal of Hydrology*, v. 573, p. 970–982.

FELDMEYER, D.; WILDEN, D.; JAMSHED, A.; BIRKMANN, J. (2020). "Regional Climate Resilience Index: A Novel Multimethod Comparative Approach for Indicator Development, Empirical Validation and Implementation". *Ecological Indicators*, v. 119, p. 106861.

HOCHRAINER-STIGLER, S.; KEATING, A.; VELEV, S.; CHAPAGAIN, D.; HYUN, J.-H.; LAURIEN, F.; GUIMARAES, R.; CLERCQ-ROQUES, R.; MECHLER, R. (2025). "Assessing Community Resilience: Validating a Universally Applicable Flood Resilience Measurement Framework and Tool". *International Journal of Disaster Risk Science*, v. 16, p. 891–902.

REZENDE, O. M.; MIRANDA, F. M.; HADDAD, A. N.; MIGUEZ, M. G. (2019). "A Framework to Evaluate Urban Flood Resilience of Design Alternatives for Flood Defence Considering Future Adverse Scenarios". *Water*, v. 11, n. 7, p. 1485.

SATOUR, N.; RAJI, O.; EL MOÇAYD, N.; KACIMI, I.; KASSOU, N. (2021). "Spatialized Flood Resilience Measurement in Rapidly Urbanized Coastal Areas with a Complex Semi-Arid Environment in Northern Morocco". *Natural Hazards and Earth System Sciences*, v. 21, p. 1101–1118.

AGRADECIMENTOS

As autoras agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo apoio financeiro à pesquisa, por meio do Projeto nº 403510/2022-8 e da bolsa de doutorado (Processo nº 165485/2024-8).