

VALIDAÇÃO DA CALIBRAÇÃO DE CURVAS PARAMÉTRICAS PARA SISTEMA DE ALERTAS DE INUNDAÇÕES E ALAGAMENTOS EM REGIÕES URBANAS

Dário Hachisu Hossoda^{1, 2}; Hermes Xandó Rodrigues²; Thiago Masaharu Osawa¹; Elton Vicente Escobar-Silva³; Joaquin Ignacio Bonnet Carrère Garcia¹

RESUMO - Sistemas de alerta hidrometeorológicos são ferramentas essenciais para mitigar os impactos associados a inundações e alagamentos urbanos. Este trabalho apresenta a validação de uma metodologia baseada em curvas paramétricas de intensidade-duração para classificação de níveis de alerta em bacias urbanas da região do Grande ABC de São Paulo, Brasil. A metodologia utiliza dados pluviométricos e registros históricos de ocorrências de inundações e alagamentos para calibração de curvas associadas aos níveis de atenção e alerta. Foram analisadas bacias hidrográficas com diferentes características espaciais, utilizando séries temporais de precipitação com resolução temporal de 10 minutos e dados de ocorrências de defesas civis municipais. Os resultados indicaram comportamento consistente entre a intensidade, a duração e a precipitação acumulada dos eventos classificados, além da capacidade do modelo de identificar eventos associados a impactos reportados. Observaram-se diferenças significativas nos parâmetros calibrados entre as sub-bacias estudadas, o que reforça a necessidade de calibração individualizada. A abordagem proposta se mostra adequada para sistemas de previsão de eventos de extremos hidrológicos em bacias urbanas, contribuindo para ações preventivas e para o aumento da resiliência urbana.

Palavras-chave: sistemas de alertas, inundações urbanas, modelo paramétrico

ABSTRACT - Hydrometeorological warning systems are essential tools for mitigating impacts of urban floods and inundation events. This study presents the validation of a methodology based on intensity-duration parametric curves for classifying warning levels in urban watersheds in the Grande ABC region of São Paulo, Brazil. The methodology uses rainfall data and historical flood records to calibrate curves for warning and alert levels. Watersheds with different spatial characteristics were analyzed using rainfall time series with 10-minute temporal resolution and occurrence records provided by municipal civil defense agencies. The results indicated consistent behavior among rainfall intensity, duration, and accumulated precipitation for the classified events, as well as the model's capability to identify events associated with reported impacts. Significant spatial variability among the watersheds was observed, highlighting the need for individualized calibration. The proposed approach is suitable for forecasting extreme hydrological events in urban watersheds, contributing to preventive actions and increased urban resilience.

Keywords: warning systems, urban floods, parametric model

INTRODUÇÃO

As inundações e os alagamentos urbanos representam um dos principais riscos hidrometeorológicos em regiões metropolitanas, intensificados pela impermeabilização do solo e pelo aumento da frequência de eventos extremos de precipitação associados às mudanças

¹Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, dario.hossoda@usp.br, thiago.osawa@usp.br, joaquinbonne@usp.br

²Fundação Centro Tecnológico de Hidráulica - FCTH/Laboratório de Sistemas de Suporte a Decisões - LabSid, hermes@labsid.eng.br

³Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais - CEMADEN, elton.escobar@cemaden.gov.br

climáticas (Marengo *et al.*, 2020; Trisnawan; Wati, 2026; Escobar-Silva *et al.*, 2026). Além dos danos materiais, esses eventos causam perdas humanas e impactos socioeconômicos significativos, afetando tanto países desenvolvidos quanto países em desenvolvimento.

A Região Metropolitana de São Paulo apresenta tendência de aumento no número de dias com chuvas intensas nas últimas décadas, resultando em impactos recorrentes relacionados a inundações, alagamentos e movimentos de massa (Marengo *et al.*, 2020). Nesse contexto, os municípios do Grande ABC destacam-se pela elevada densidade urbana e pelo alto grau de impermeabilização do solo, características que potencializam a suscetibilidade a eventos hidrológicos extremos. Projeções climáticas baseadas em cenários do CMIP6 indicam alterações relevantes nos padrões de precipitação na região nas próximas décadas (Valverde *et al.*, 2023), reforçando a necessidade de desenvolver estratégias de adaptação e mitigação.

Além da mitigação de impactos imediatos, os sistemas de monitoramento e alerta desempenham um papel fundamental no aumento da resiliência urbana frente a eventos hidrometeorológicos extremos. Segundo Bertilsson *et al.* (2019), a avaliação da resiliência às inundações é importante para definição de metas concretas de adaptação e para a comparação entre diferentes estratégias de controle de cheias, permitindo uma melhor utilização das informações disponíveis para suporte à tomada de decisão. De forma semelhante, Xu *et al.* (2023) destacam que a resiliência urbana a inundações está diretamente associada à ocorrência de pontos de alagamento e às capacidades estruturais e operacionais dos sistemas urbanos, como a drenagem, a resposta emergencial e o monitoramento. Os autores ressaltam que ferramentas de avaliação e previsão contribuem para o planejamento urbano resiliente e para o aumento da capacidade adaptativa das cidades frente a eventos extremos.

Modelos baseados em dados (*data-driven*) têm se mostrado alternativas eficazes para aplicações de *nowcasting* de inundações urbanas, apresentando resultados satisfatórios mesmo em bacias com escassez de informações físicas detalhadas (Zheng *et al.*, 2024; Hossoda *et al.*, 2025), nesse contexto, metodologias baseadas em curvas paramétricas de intensidade-duração permitem a definição de limiares hidrológicos associados a diferentes níveis de criticidade, utilizando dados pluviométricos em tempo real e registros históricos de impactos.

Dessa forma, este estudo tem como objetivo validar a aplicação de uma metodologia de construção de curvas paramétricas para a geração de níveis de alerta de inundação e alagamento em bacias urbanas da região do Grande ABC. Espera-se que os resultados contribuam para o desenvolvimento de estratégias de monitoramento hidrometeorológico voltadas ao aumento da resiliência urbana e à redução dos impactos associados a eventos extremos.

MATERIAIS E MÉTODOS

Região de Estudo

A região do Grande ABC, composta por sete municípios: Santo André, São Bernardo do Campo, São Caetano do Sul, Diadema, Mauá, Ribeirão Pires e Rio Grande da Serra, está localizada na porção sudeste da Região Metropolitana de São Paulo, é caracterizada por alta densidade urbana e histórico recorrente de inundações e alagamentos, especialmente durante a estação chuvosa (outubro–março), associados a eventos convectivos de curta duração e alta intensidade (Marengo *et al.*, 2020). A bacia do Tamanduateí onde se insere a maior parte da área de estudo é afluente do rio Tietê, cujo os córregos foram canalizados para implantação urbana, o que potencializa a ocorrência de inundações e alagamentos em áreas adjacentes.

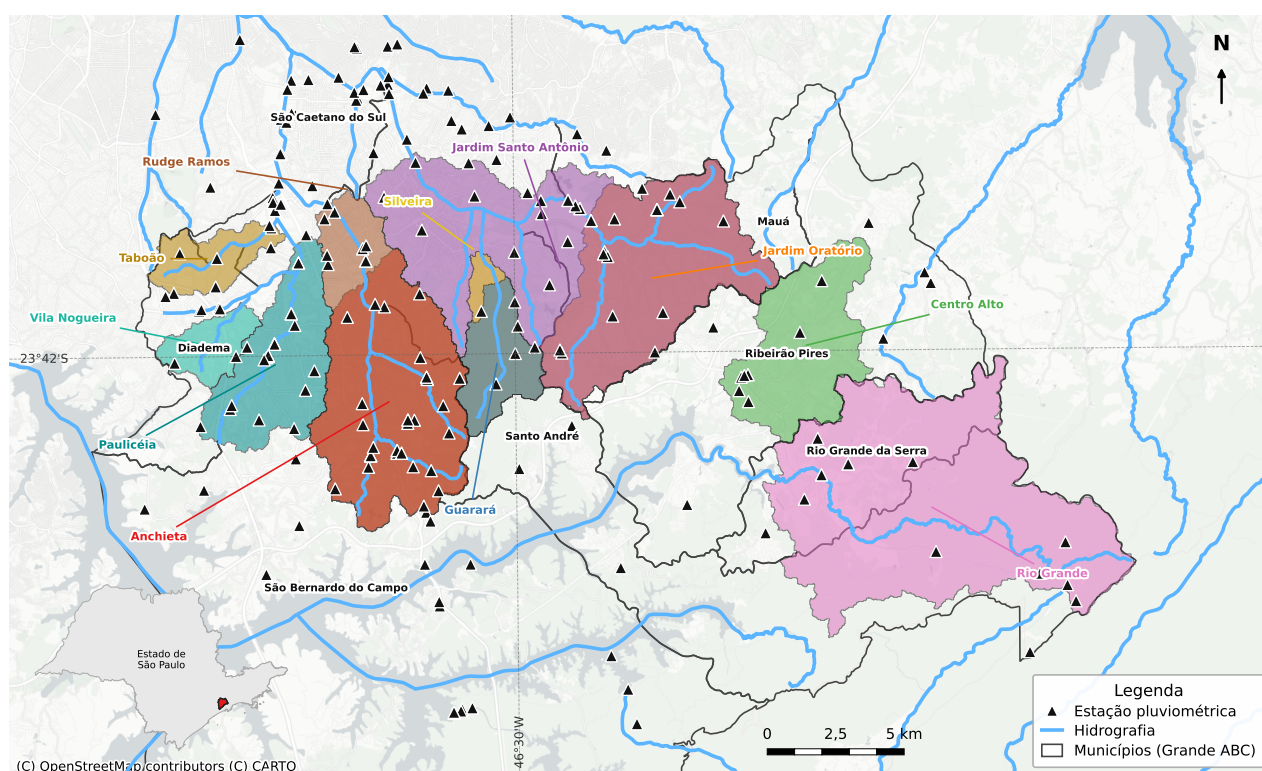


Figura 1: Região de Estudo.

A Figura 1 apresenta a região de estudo, destacando os municípios do Grande ABC, a identificação das bacias hidrográficas e as estações pluviométricas utilizadas na análise. As bacias utilizadas para o estudo foram nomeadas de acordo com nomes notáveis ou bairros da região e derivam da agregação de ottobacias da Agência Nacional de Águas (2017). Para garantir que diferentes pontos ao longo dos cursos d'água fossem contemplados, foram utilizadas agregações de sub-bacias de modo que a bacia Anchieta é uma sub-bacia daquela identificada em Rudge Ramos, assim como a bacia Jd. Santo Antônio contém as bacias Jd. Oratório, Silveira e Guarará. As bacias da região de estudo, com exceção da Centro Alto e do Rio Grande, em Ribeirão Pires e Rio Grande da Serra, pertencem à bacia do Rio Tamanduateí.

Dados

A precipitação considerada é uma média espacial da chuva na bacia hidrográfica, calculada pelo Método de Thiessen (1911) com base nas estações pluviométricas localizadas no interior ou nas proximidades de cada sub-bacia, provenientes do Sistema Integrado de Bacias Hidrográficas da Agência SP Águas (2025), cujo intervalo de recebimento de dados é de 10 minutos. O número de estações utilizadas por sub-bacia e o período de dados disponível para calibração são apresentados na Tabela 1. Para evitar o efeito de atenuação das chuvas com longa duração, considera-se como duração efetiva o intervalo de tempo necessário para que se acumule 80% da precipitação total do evento.

Modelagem de Alertas

A metodologia utilizada para a construção das curvas paramétricas segue a proposição de Hossoda *et al.* (2025), em que o alerta para uma dada bacia é definido pela intensidade e duração da chuva. A curva paramétrica é obtida pela Equação 1.

$$i = a \cdot \exp(-b \cdot d) \quad (1)$$

onde i representa a intensidade da chuva (mm/h), d representa a duração do evento (min) e a e b são os parâmetros a serem calibrados, com $b > 0$ de modo que a intensidade decresce com a duração. A calibração é realizada utilizando dados históricos de eventos de chuva e seus respectivos impactos, buscando ajustar os parâmetros a e b para que a curva paramétrica represente adequadamente a relação entre intensidade e duração da chuva para o evento em questão. Para definir os níveis de alerta são utilizados pontos (i, d) provenientes de eventos com registro de ocorrência de eventos. A precipitação acumulada do evento é dada por $P_{ac} = i \cdot d / 60$ (mm) e utilizada na representação gráfica da classificação dos eventos.

As curvas que definem as fronteiras inferior e superior derivam do ajuste da curva passando abaixo dos pontos considerados e do ajuste da curva ajustada com o método dos mínimos quadrados, respectivamente, ao passo que o ajuste da curva intermediária é realizado por meio da utilização do 5º percentil dos pontos. Essa formulação permite a reprodutibilidade da metodologia para diferentes regiões.

RESULTADOS

Características das Calibrações

Embora a metodologia empregada para o cálculo e a calibração das curvas seja reprodutível, devido às distintas características das bacias hidrográficas, principalmente a área, espera-se a ocorrência de diferenças nos coeficientes calibrados. A Tabela 1 apresenta, para cada sub-bacia, o número de estações pluviométricas utilizadas, o período de calibração e os coeficientes das curvas paramétricas obtidos. Complementarmente, a Figura 2 apresenta a classificação dos eventos para as bacias em estudo.

Tabela 1: Estações pluviométricas, período de calibração e coeficientes das curvas paramétricas por sub-bacia.

Sub-bacia	Nº est.	Período	Curva inferior		Curva intermediária		Curva superior	
			<i>a</i>	<i>b</i>	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>a</i>	<i>b</i>
Anchieta	10	2008–2024	60,90	2,84	25,30	0,38	41,60	0,44
Centro Alto	8	2008–2024	11,21	0,26	23,94	0,21	33,18	0,20
Guarará	10	2008–2024	40,45	2,23	45,75	0,86	56,73	0,58
Jd. Oratório	10	2008–2024	41,58	1,57	49,98	0,74	90,23	1,20
Jd. Santo Antônio	10	2008–2024	19,66	0,91	16,27	0,37	28,21	0,37
Paulicéia	10	2008–2024	28,41	1,18	33,63	0,39	44,96	0,30
Rio Grande	3	2008–2024	47,67	0,87	46,91	0,63	59,99	0,67
Rudge Ramos	10	2008–2024	13,26	0,56	20,42	0,58	35,07	0,36
Silveira	10	2008–2024	41,34	2,16	45,39	0,78	59,71	0,60
Taboão	10	2008–2024	52,30	1,13	50,66	0,69	64,33	0,63
Vila Nogueira	10	2008–2024	96,44	1,36	58,86	0,85	130,88	1,14

* Nº est.: postos disponíveis na rede SIBH em raio de 5 km da sub-bacia (máximo utilizado: 10).

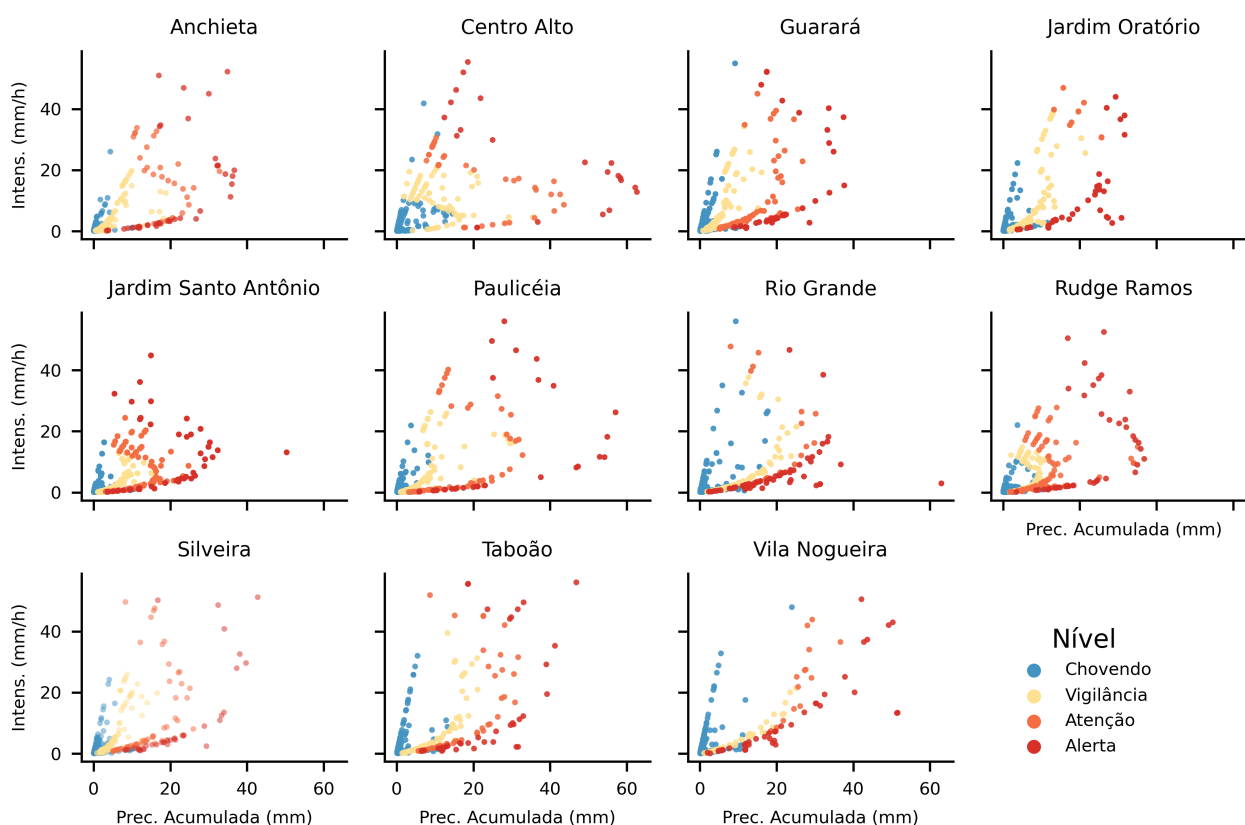


Figura 2: Classificação dos níveis de alerta por bacia em função da intensidade média e da precipitação acumulada dos eventos.

É possível observar comportamentos semelhantes entre as bacias analisadas, nos quais os níveis de alerta concentram-se predominantemente em eventos de baixa intensidade e de reduzido volume acumulado. Esse comportamento está associado à influência da duração da precipitação na classificação dos eventos, o que permite que precipitações persistentes, mesmo com intensidades

médias menores, sejam classificadas em níveis mais elevados de criticidade. Segundo Hossoda *et al.* (2025), a interação entre variáveis derivadas da precipitação e a duração do evento introduz um novo grau de informação ao sistema de alerta, aspecto que pode ser verificado por meio da análise de correlação múltipla entre as variáveis de entrada. Dessa forma, a utilização conjunta dessas variáveis permite uma melhor representação da complexidade associada à ocorrência de inundações e alagamentos em ambientes urbanos.

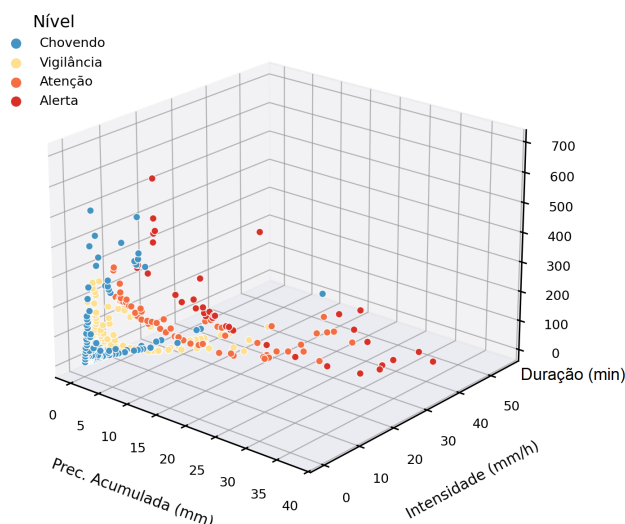


Figura 3: Relação entre precipitação acumulada, intensidade, duração e níveis de alerta para a bacia do Guarará.

A Figura 3 apresenta a distribuição tridimensional dos eventos classificados para a bacia do Guarará, escolhida por sua representatividade no comportamento geral dos alertas, sobretudo por possuir a maior quantidade de dados de eventos registrados utilizados na calibração, considerando precipitação acumulada, intensidade e duração. Observa-se que eventos associados aos níveis mais elevados de alerta concentram-se tanto em precipitações intensas de curta duração quanto em eventos persistentes com maiores volumes acumulados. Tal comportamento evidencia a relevância da utilização conjunta das variáveis de intensidade e de duração na representação de eventos críticos em ambientes urbanos. Além disso, é possível observar uma separação gradual entre os níveis de alerta, o que indica coerência na classificação dos eventos realizada pela metodologia paramétrica empregada.

Validação dos Alertas

Para o alinhamento do modelo com a realidade, foram levantados dados fornecidos pelas defesas civis dos municípios que compõem o Grande ABC, além da verificação de eventos extremos por meio de informações de mídias jornalísticas. A Figura 4 apresenta os alertas emitidos pelo modelo em relação às ocorrências registradas pelas defesas civis.

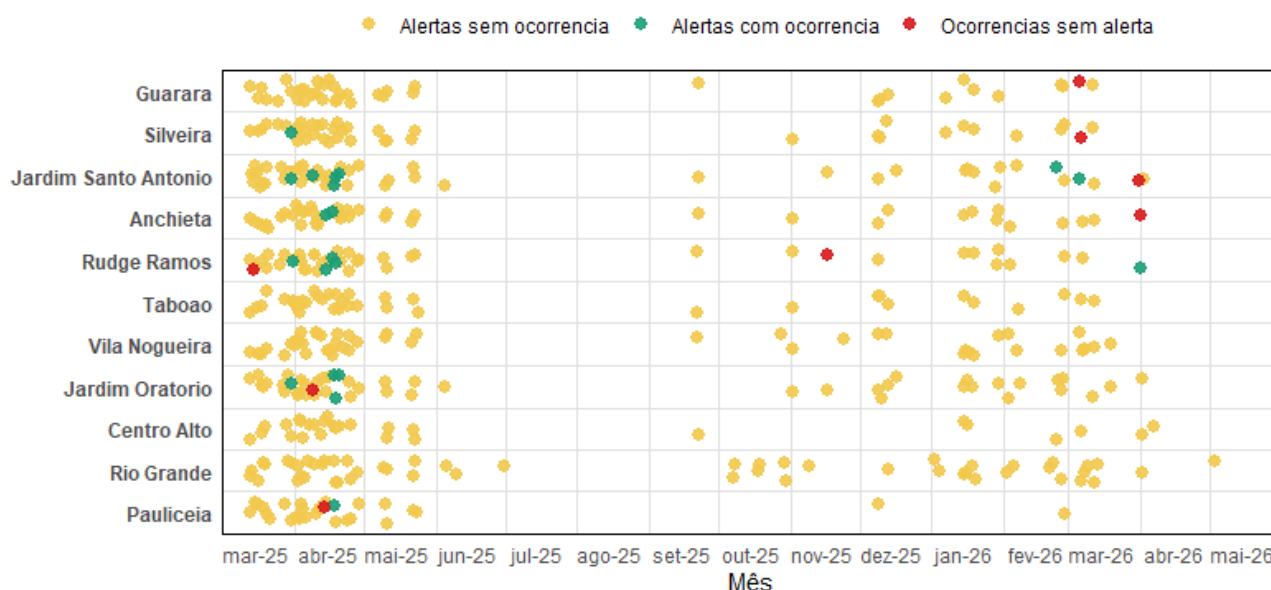


Figura 4: Classificações de nível de alerta provenientes do modelo calibrado para as bacias da região de estudo.

É possível verificar que os modelos calibrados foram capazes de fornecer alertas de chuva intensa para eventos que causaram impactos e foram reportados pelas defesas civis na plataforma. Conforme Valverde (2025), o período de março de 2025 possui um acumulado de 161,7 mm de precipitação, sendo que mais de 60% deste valor ocorreu no dia 31, caracterizando um evento extremo.

CONCLUSÕES

Os resultados obtidos demonstram que a modelagem de alertas baseada em curvas paramétricas de intensidade-duração apresentou desempenho consistente na identificação de eventos associados a impactos hidrológicos em bacias urbanas da região do Grande ABC. A metodologia foi capaz de representar diferentes padrões de precipitação associados a inundações e alagamentos, considerando tanto eventos de elevada intensidade e curta duração quanto precipitações persistentes com maiores volumes acumulados.

As análises revelaram diferenças significativas nos coeficientes calibrados entre as sub-bacias estudadas, evidenciando que cada área apresenta combinações distintas de intensidade e duração associadas a eventos com impactos registrados. A amplitude dessas diferenças indica que a adoção de limiares genéricos seria inadequada para a região, reforçando a importância de uma calibração individualizada das curvas paramétricas para cada bacia urbana, visando aprimorar a confiabilidade dos níveis de alerta emitidos.

A comparação entre os alertas gerados pelo modelo e os registros históricos fornecidos pelas defesas civis indicou o potencial da metodologia para aplicações operacionais em sistemas de monitoramento e *nowcasting* hidrológico. Nesse contexto, a utilização de dados pluviométricos em

tempo real, associado a limiares calibrados, representa uma alternativa de baixo custo computacional e elevada capacidade de reprodução para o suporte à tomada de decisão em situações de risco.

Além da aplicação operacional, a metodologia contribui para estratégias voltadas ao aumento da resiliência urbana frente a eventos hidrometeorológicos extremos, fornecendo subsídios para ações preventivas, planejamento urbano e gerenciamento de emergências. Destaca-se, entretanto, que a qualidade da calibração depende diretamente da disponibilidade e da consistência dos registros históricos de ocorrências, o que evidencia a importância da sistematização e da disponibilização transparente dessas informações pelos órgãos responsáveis.

Por fim, é possível ainda estabelecer, com base em métricas estatísticas, o limiar: a quantidade de registros de eventos que torne o modelo suficientemente preciso para assegurar que o alerta emitido esteja dentro de um intervalo de confiança desejável.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem pelo apoio institucional da Fundação Centro Tecnológico de Hidráulica (FCTH) e do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade de São Paulo (PPGEC-USP) na realização deste estudo. Ademais, agradecimentos à Profa. Dra. María Cleofé Valverde Brambila, cuja contribuição com a compilação e disponibilização de dados de eventos das defesas civis da região foi fundamental para a calibração do sistema de alertas apresentado ao Consórcio Intermunicipal Grande ABC. O presente trabalho foi realizado com o apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001 e da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo, projeto nº. 2024/02748-7 (E.V.E.S.).

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA DE ÁGUAS DO ESTADO DE SÃO PAULO. *SIBH – Sistema Integrado de Bacias Hidrográficas: Dados Hidrológicos do Estado de São Paulo*. São Paulo: [s. n.], 2025. Disponível em: <https://cth.daee.sp.gov.br/sibh/>.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. *Bacias Hidrográficas Ottocodificadas (Níveis Otto 1-7)*. Brasília, Brasil: Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos – SNIRH, 2017. Base Hidrográfica Ottocodificada Multiescalas 2017. Disponível em: <https://metadados.snirh.gov.br/geonetwork/srv/api/records/b228d007-6d68-46e5-b30d-a1e191b2b21f>.

BERTILSSON, L.; WIKLUND, K.; MOURA TEBALDI, I. de; REZENDE, O. M.; VERÓL, A. P.; MIGUEZ, M. G. Urban flood resilience – A multi-criteria index to integrate flood resilience into urban planning. *Journal of Hydrology*, v. 573, p. 970–982, jun. 2019. ISSN 0022-1694. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2018.06.052.

ESCOBAR-SILVA, E. V.; MARQUES-CARVALHO, R.; ALMEIDA, C. M. de; SANTOS, L. B. L.; BOURSCHIEDT, V.; MIKOSZ, L.; LIMA, G. R. T. de; MARCHEZINI, V.; ZERI, M.; CAMARINHA, P. I. M.; CUNHA, A. P. M. A.; LEONARDI, F. G. Water-related disasters in Brazil:

an assessment from 1991 to 2024. *Environmental Research Letters*, IOP Publishing, v. 21, n. 7, p. 074015, abr. 2026. DOI: 10.1088/1748-9326/ae5991. Disponível em: <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ae5991>.

HOSSODA, D. H.; PEREZ, R. F.; TERCINI, J. R. B.; BONNECARRÈRE, J. I. G. Data-Driven Modeling for Urban Flood Warning Systems: A Case Study in the Guarará Basin, Brazil. *Journal of Flood Risk Management*, v. 18, n. 3, 2025. DOI: 10.1111/jfr3.70110.

MARENGO, J. A.; ALVES, L. M.; AMBRIZZI, T.; YOUNG, A.; BARRETO, N. J. C.; RAMOS, A. M. Trends in extreme rainfall and hydrogeometeorological disasters in the Metropolitan Area of São Paulo: a review. *Annals of the New York Academy of Sciences*, Wiley, v. 1472, n. 1, p. 5–20, fev. 2020. ISSN 1749-6632. DOI: 10.1111/nyas.14307.

THIESSEN, A. H. Precipitation Averages for Large Areas. en, jul. 1911. ISSN 1520-0493. DOI: 10.1175/1520-0493(1911)39%3C1082b:PAFLA%3E2.0.CO;2. Acesso em: 13 maio 2026.

TRISNAWAN, A. B.; WATI, S. Urban Flood Early Warning System Based on Sensor Networks and Big Data. *Journal of Multidisciplinary Research and Technology*, Indonesian Society of Engineering e Technology, v. 2, n. 1, p. 12–26, jan. 2026. ISSN 3089-3380. DOI: 10.63891/j-mart.v2i1.119.

VALVERDE, M. C. *Boletim Climatológico de Santo André – Março de 2025*. v. 6. Santo André, São Paulo, mar. 2025. Elaborado no âmbito do Edital nº 001/2024 – Adapta ABC Paulista: Fase II – Lente Climática. Colaboração: Departamento de Proteção e Defesa Civil de Santo André e Ricardo Brambila.

VALVERDE, M. C.; CALADO, B. N.; CALADO, G. G.; KUROKI, L. Y.; BRAMBILA, R.; SOUSA, A. R. d. Climate projections of precipitation and temperature in cities from ABC Paulista, in the Metropolitan Region of São Paulo—Brazil. *Frontiers in Climate*, v. 5, 2023. ISSN 2624-9553. DOI: 10.3389/fclim.2023.1127026.

XU, T.; XIE, Z.; JIANG, F.; YANG, S.; DENG, Z.; ZHAO, L.; WEN, G.; DU, Q. Urban flooding resilience evaluation with coupled rainfall and flooding models: a small area in Kunming City, China as an example. *Water Science and Technology*, v. 87, n. 11, p. 2820–2839, maio 2023. ISSN 0273-1223. DOI: 10.2166/wst.2023.149. Acesso em: 25 mar. 2026.

ZHENG, Y.; JING, X.; LIN, Y.; SHEN, D.; ZHANG, Y.; YU, M.; ZHOU, Y. Research on nowcasting prediction technology for flooding scenarios based on data-driven and real-time monitoring. *Water Science Technology*, IWA Publishing, v. 89, n. 11, p. 2894–2906, maio 2024. ISSN 1996-9732. DOI: 10.2166/wst.2024.174.