

Avaliação do risco de inundação em Porto Alegre-RS

Flood risk assessment in Porto Alegre-RS

Daniele Feitoza Silva¹ , Carlos Eduardo Morelli Tucci¹ ,
André Luiz Lopes da Silveira¹ , Paola Marques Kuele¹ ,
Rodrigo Biz Willig¹ , Caetano Coelho Silva Fraga² ,
Bruno Kerwald Schneider²

¹Rhama Analysis, Porto Alegre, RS, Brasil. E-mails: pariconha@gmail.com, carlos.tucci@rhama-analysis.com, andre.silveira@rhama-analysis.com, paola.kuele@rhama-analysis.com, rodrigo.willig@rhama-analysis.com

²Departamento Municipal de Água e Esgotos – DMAE, Porto Alegre, RS, Brasil. E-mails: caetano.fraga@dmae.prefpoa.com.br, bruno.schneider@dmae.prefpoa.com.br

Como citar: Silva, D. F., Tucci, C. E. M., Silveira, A. L. L., Kuele, P. M., Willig, R. B., Fraga, C. C. S., & Schneider, B. K. (2026). Avaliação do risco de inundação em Porto Alegre-RS. *Revista de Gestão de Água da América Latina*, 23, e12. <https://doi.org/10.21168/reg.v23e12>

RESUMO: Em maio de 2024, Porto Alegre registrou a maior enchente dos últimos 126 anos (1899–2024), superando o evento histórico de 1941, que motivou, na década de 1970, a implantação do Sistema de Proteção Contra Cheias (SPCC). O risco de inundação na região depende do comportamento dos níveis do Lago Guaíba, que resultam da combinação de três forçantes em escalas distintas: a contribuição das bacias a montante, a condição de jusante imposta pela Lagoa dos Patos e a ação dos ventos. Este estudo estimou o risco futuro de cheias com base na série histórica de níveis, ajustando distribuições estatísticas não-estacionárias. Diferentes parametrizações da distribuição de Gumbel foram avaliadas, selecionando-se o modelo com melhor desempenho estatístico. As duas maiores cheias da série – 1941 e 2024 – se mostraram “outliers”, situando-se acima do limite superior do intervalo de confiança de 95%, indicando que seus tempos de retorno podem ser superiores aos estimados pelo modelo estatístico ajustado. As projeções do risco até o ano de 2100 indicam aumento progressivo da magnitude das enchentes. Para o evento com tempo de retorno de 100 anos, o nível da enchente aumentou 9,0% para o ano 2100. Os resultados partem do pressuposto de que a tendência observada nos últimos 126 anos é representativa da não-estacionariedade futura, não projetando explicitamente alterações climáticas decorrentes das atividades ambientais e econômicas globais.

Palavras-chave: Cheias; Tempo de Retorno; Não-estacionariedade; Mudanças Climáticas.

ABSTRACT: In May 2024, Porto Alegre experienced the largest flood recorded in 126 years (1899–2024), surpassing the historic 1941 event that led to the implementation of a Flood Protection System (SPCC) in the 1970s. Flood risk in the region depends on the behavior of the water levels of Lake Guaíba, which result from the combination of three forcings acting at distinct scales: the contribution of the upstream basins, the downstream boundary condition imposed by Lagoa dos Patos, and wind action. This study estimates future flood risk based on the adjustment of a non-stationary statistical distribution for the historical water level series. Different parameterizations of the Gumbel distribution were evaluated, and the model with the best statistical performance was selected. The two largest floods in the series — 1941 and 2024 — were characterized as outliers, falling above the upper limit of the model’s 95% confidence interval, indicating that the fitted model may underestimate the magnitude associated with high return periods. Risk projections up to 2100 indicate a progressive increase in flood magnitude. For the 100-year return period event, flood levels are projected to increase by approximately 9.0% by 2100. The results assume that the trend observed over the past 126 years adequately represents future non-stationarity, without explicitly incorporating prospective climate change scenarios driven by global environmental and economic activities.

Keywords: Floods; Time of Recurrence; Non-stationarity; Climate Change.

INTRODUÇÃO

Entre abril e maio de 2024 ocorreu a maior enchente em 126 anos no Estado do Rio Grande do Sul (RS), Brasil. O evento teve impactos sociais, econômicos e ambientais significativos, tais como: 96% dos municípios do

Recebido: Março 26, 2026. Revisado: Junho 10, 2026. Aceito: Julho 23, 2026.



Este é um artigo publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Attribution (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>), que permite uso, distribuição e reprodução em qualquer meio, sem restrições desde que o trabalho original seja corretamente citado.

Estado foram afetados; 2,4 milhões de pessoas foram impactadas; 423 mil pessoas tiveram que deixar suas casas; 185 óbitos; 23 estão desaparecidas (SOS Enchentes, 2025), e as perdas econômicas foram de cerca de R\$ 89 bilhões (Comissão Econômica para a América Latina e o Caribe, 2024).

Na Região Metropolitana de Porto Alegre (RMPA), os efeitos foram amplificados pela configuração do sistema hidrográfico. O Lago Guaíba funciona como corpo receptor das contribuições das bacias do Jacuí, Taquari-Antas, Caí, Sinos e Gravataí, acumulando volumes expressivos de escoamento gerados pelas bacias. A combinação entre precipitações persistentes e distribuídas, elevada umidade antecedente e a concentração urbana – cerca de 4 milhões de pessoas vivem na RMPA – junto às margens, aumentou a exposição à inundação, com consequências diretas sobre habitação, serviços essenciais e funcionamento das cidades. Além das perdas diretas, houve a interrupção de infraestrutura crítica e da centralidade logística regional. O evento comprometeu a disponibilidade de água potável, exigindo a adoção de racionamento em alguns bairros em função da inundação de duas importantes captações de bombeamento de água bruta.

Embora Porto Alegre possua um sistema de diques para proteger a cidade das enchentes do Guaíba e rio Gravataí, construído na década de 1970, o sistema se mostrou insuficiente durante o evento, em parte por limitações de concepção, pela não implementação integral das estruturas previstas e, principalmente, por vulnerabilidades acumuladas na operação e manutenção. Diante da magnitude do nível d'água do Guaíba observada em 2024, a cota de projeto do sistema torna-se um elemento central na avaliação do risco.

Para recuperar o sistema de proteção contra enchentes de Porto Alegre, além de todos os aspectos hidráulicos de funcionamento do sistema, a principal questão é a reavaliação da cota de projeto do coroamento dos diques. Nesta definição é necessário ter em conta os efeitos de mudança climática devido a tendência atual de aquecimento do planeta que tende a aumentar a frequência e intensidade dos eventos máximos (Kundzewicz et al., 2014; Yang et al., 2021).

Diante dos eventos mais recentes, bem como dos efeitos da variabilidade ou mudança climática, a análise de frequência de eventos extremos vem sendo reformulada. Paiva et al. (2024a) indicaram critérios hidrológicos para adaptação à mudança climática em projetos de infraestrutura e no mapeamento de áreas de risco. A estacionariedade¹, premissa clássica da análise de frequência de extremos, segundo a qual as propriedades estatísticas dos eventos permanecem constantes ao longo do tempo, é o fundamento histórico do dimensionamento de obras hidráulicas, mas tornou-se insuficiente frente às evidências de mudanças nas séries (Milly et al., 2008). Em resposta, os conceitos de tempo de retorno e nível de risco foram estendidos para condições não-estacionárias, nas quais a probabilidade de excedência varia ao longo do tempo (Olsen et al., 1998; Salas & Obeysekera, 2014). Tais abordagens, contudo, exigem cautela, pois a incerteza tende a dominar a estimativa dos extremos sob não-estacionariedade (Serinaldi & Kilsby, 2015). Em escala regional e nacional, distribuições com parâmetros dependentes do tempo já foram aplicadas a séries de vazões e precipitações máximas (Clarke, 2013; Bartiko et al., 2017; Silva et al., 2023). Ainda assim, essa abordagem foi pouco aplicada a sistemas lagunares.

No que diz respeito ao objeto de estudo, as perguntas principais a serem respondidas são: a série hidrológica existente, que é de 1899 a 2024, é representativa do comportamento futuro das enchentes? O risco e sua incerteza de estimativa podem ser considerados permanentes quando existe tendência de alteração no tempo das condições climáticas? Estas perguntas foram respondidas neste artigo para os níveis de cheia de Porto Alegre.

BACIA, NÍVEIS DE CHEIAS E EVENTOS

Bacia Hidrográfica

O Lago Guaíba recebe o escoamento do Delta do Jacuí e este recebe o escoamento de quatro bacias principais (Figura 1): Jacuí (incluindo a do Taquari-Antas), Caí, Sinos e Gravataí, mais os das bacias laterais do lago, somando cerca de 85 mil km² de área de drenagem, correspondendo a quase 1/3 da área do Rio Grande do Sul². As águas que chegam ao Delta escoam para o lago Guaíba, que margeia parcialmente o município de Porto Alegre, e seguem sentido Lagoa dos Patos, passando pelo canal Rio Grande até chegar ao Oceano Atlântico (Figura 1). No Guaíba o nível d'água é controlado por diferentes processos, como: (i) os volumes de água que aportam o lago; (ii) a capacidade de fluxo entre o Guaíba e

¹ O aeroporto internacional de Porto Alegre recebe cerca de 7,5 milhões de passageiros por ano (base 2023), permanecendo fora de operação por 5 meses (maio a outubro) para reconstruir a pista de aeronaves (Porto Alegre Airport, 2025).

² Segunda maior bacia da América do Sul, depois da Bacia Amazônica.

a Lagoa dos Patos e na saída para o Oceano Atlântico, onde existem um estreitamento; e (iii) efeitos do vento sobre a superfície do lago (Lopes et al., 2018; Possa et al., 2022).

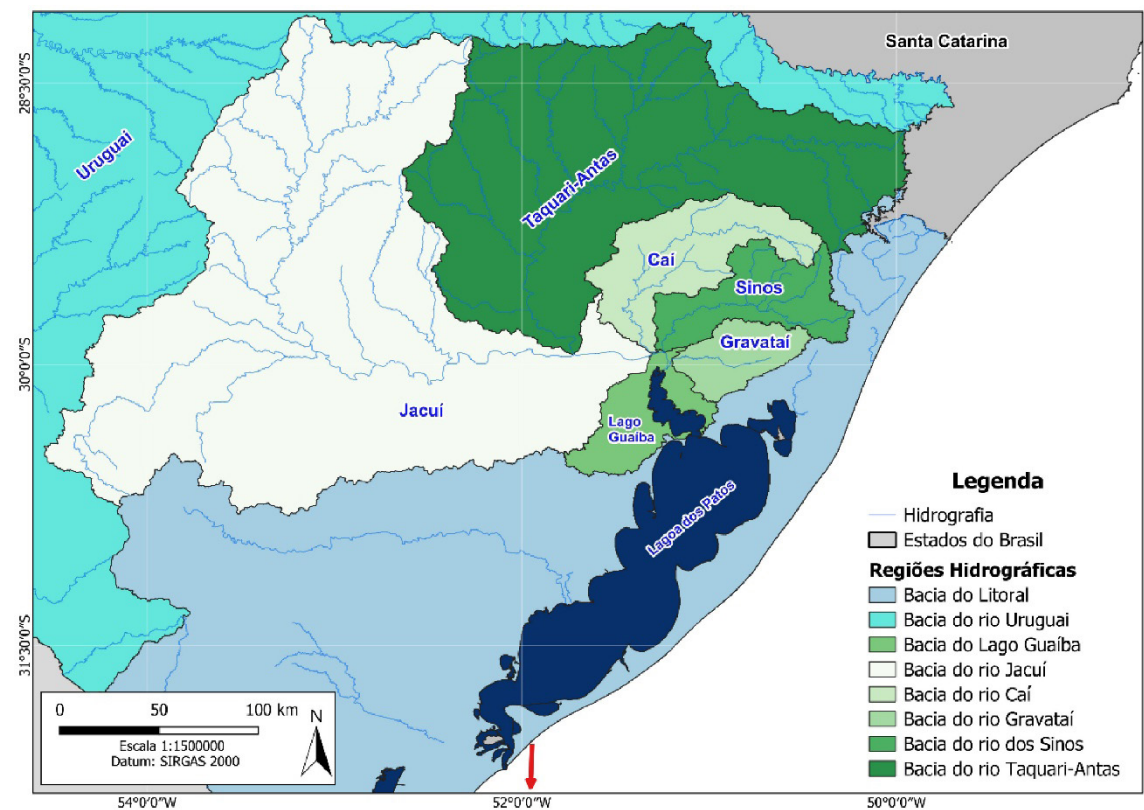


Figura 1. Região Hidrográfica do Guaíba.

Níveis Máximos do Guaíba

Para este estudo foram obtidos os níveis máximos anuais do Lago Guaíba, em Porto Alegre RS, através de diferentes bases de dados. Os registros de níveis d’água do Guaíba, em Porto Alegre, iniciaram em 1899 (Brasil, 1968). Desde então, foram diversos os locais onde o nível foi monitorado, e por diferentes entidades responsáveis, utilizando-se estações localizadas entre o Cais Mauá C6 (Doca 4) e a Usina do Gasômetro, distantes cerca de 2,5 km, conforme indicado na Figura 2. Além do deslocamento espacial do ponto de medição, também pode haver alterações no referencial altimétrico (Datum). O histórico dos locais de medição pode ser verificado em Silveira (2020) e Germano et al. (2024). A Tabela 1 apresenta as fontes de informação da série histórica de níveis do Guaíba, também indicadas na Figura 2.

Tabela 1. Estações de monitoramento do nível do Lago Guaíba ao longo dos anos¹.

Local de medição	LAT (°)	LONG (°)	Código ANA	Período de Dados
SOP-Ponta da Cadeia	30°1'54"S	51°14'28"W	-	1899-1928
Porto Alegre-Doca 4	30°1'40"S	51°13'56"W	87450000	1929-1935 ¹
DNPVN-Doca 4	30°1'19"S	51°13'20"W	-	1936-1967
Praça da Harmonia-Ponta da Cadeia	30°1'54"S	51°14'28"W	87450003	1968-1995
Praça da Harmonia-Prédio Administrativo	30°1'36"S	51°13'52"W	-	1996-2015
Cais Mauá-C6	30°1'16"S	51°13'16"W	87450004	2016-2023
Usina do Gasômetro	30°2'5"S	51°14'30"W	87444000	2024

¹ Não houve medição em 1934.

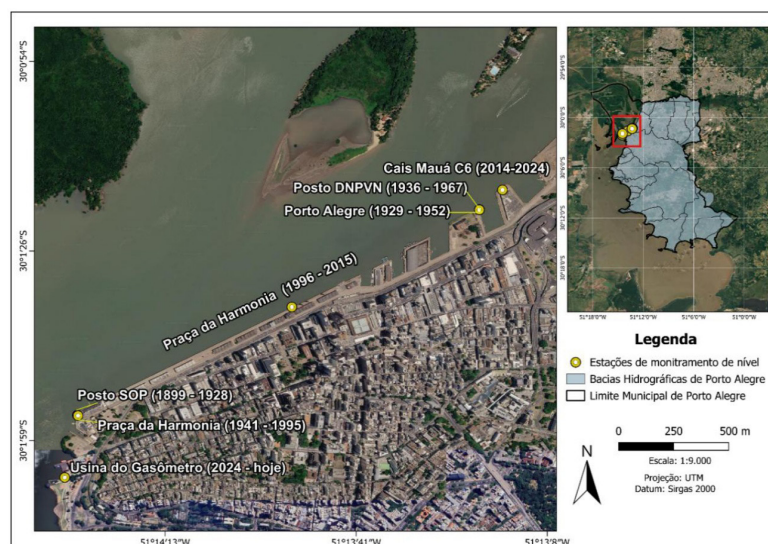


Figura 2. Localização das estações de monitoramento de nível no Guaíba e entidades responsáveis ao longo dos anos.

O monitoramento foi realizado em locais que variaram ao longo do tempo; por isso, os dados registrados em diferentes pontos nem sempre são diretamente comparáveis, em razão dos efeitos hidrodinâmicos. Segundo Paiva et al. (2024b), observam-se diferenças sistemáticas entre os níveis registrados nos distintos pontos de monitoramento, decorrentes da configuração da linha d'água tanto em condições de cheias regulares quanto em eventos extremos, especialmente em função do regime de escoamento e dos efeitos hidráulicos associados à região portuária. A rastreabilidade do Datum vertical e sua relação com "zeros" e referências locais ainda são pouco documentados ou sofreram ajustes ao longo do tempo (Germano et al., 2024; Brasil, 2024). Exemplo desta problemática no Guaíba foi evidenciado por Germano et al. (2024), durante a cheia de 2024, com a diferença entre os níveis medidos na Usina do Gasômetro e no Cais Mauá C6 atingindo 78 cm. Portanto, estes vieses produzem incertezas no estabelecimento da série de níveis máximos anuais do Guaíba.

Para adequada análise dos níveis máximos, foi realizada a homogeneização da série para um único local, o Cais Mauá C6, e referencial altimétrico Datum Imbituba-SC. A homogeneização foi então realizada a partir do pareamento de níveis máximos simultâneos em diferentes locais e das informações obtidas nos documentos de Brasil (1968), Silveira (2020) e Germano et al. (2024). Foi ajustado um polinômio de segundo grau de coeficiente de determinação (R^2) 0,92 (Figura 3), cuja representatividade se limita às extremidades dos dados pareados. Assim, todas as medições históricas foram ajustadas para representar as elevações na Doca 4 (local do linígrafo DNPVN). A Doca 4 está situada a cerca de 170 m a jusante do Cais Mauá C6, por esta razão, considerou-se que seriam equivalentes.

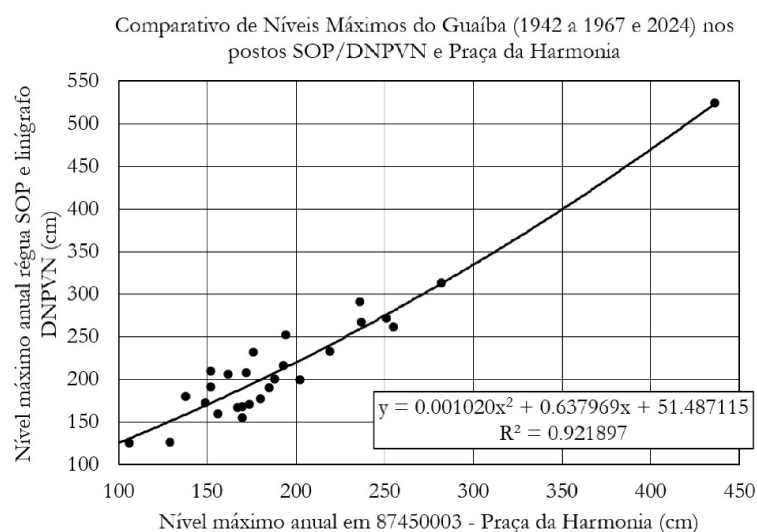


Figura 3. Relação entre níveis máximos anuais da estação 87450003 - Praça da Harmonia e o posto SOP/linígrafo da DNPVN (1942 a 1967, e 2024). Fonte: atualizado de Silveira (2020).

A conversão para o Datum altimétrico de Imbituba-SC foi realizada a partir da redução de 34 cm dos níveis, de acordo aos levantamentos topográficos recentes apresentados por Germano et al. (2024). A Figura 4 consolida, portanto, a série homogênea de níveis máximos anuais do Guaíba, no Cais Mauá C6 (Doca 4) (referência Imbituba-SC). Na Figura 4 são apresentados os níveis de inundação anuais e sua média móvel de 10 anos em Porto Alegre. Ainda, na figura, é possível identificar a cota média do piso do cais, de aproximadamente 2,66 m.

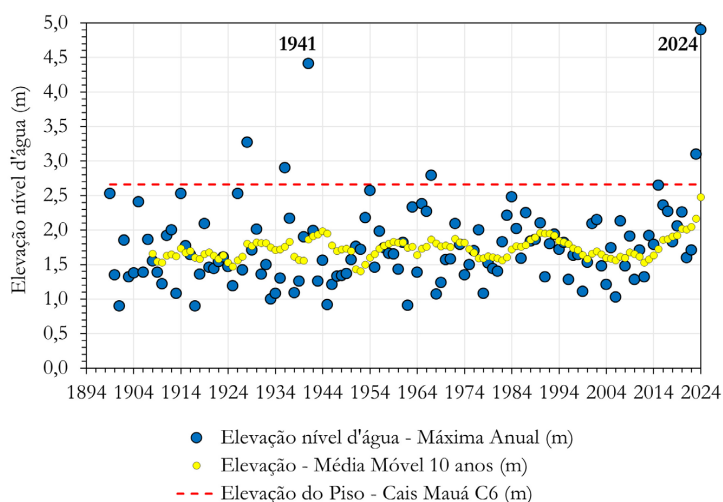


Figura 4. Níveis máximos anuais em Porto Alegre com referência a Imbituba e média móvel de 10 anos dos níveis

Enchente de 2024

- **Principais fatores:** Este evento foi resultado da combinação de vários fatores: (i) o ano precedente foi de um El Niño forte apresentando-se em maio de 2024 em fase de dissipação (Organização das Nações Unidas, 2024); (ii) bloqueio meteorológico ao norte do Estado estendendo-se para a região sudeste associado a condições secas; e (iii) Temperatura do Oceano Atlântico Tropical 2°C acima da média, e o Índice de Oscilação Multidecadal do Atlântico (AMO) aumentou para um valor máximo sem precedente em 2023 e se manteve alto em 2024 (National Oceanic and Atmospheric Administration, 2026).

O aumento da temperatura no oceano contribui para o aumento do fluxo de umidade na atmosfera da região norte do Brasil e o ar úmido foi canalizado por ventos paralelos à Cordilheira dos Andes que atingem as latitudes subtropicais e se curvam para leste alimentando as chuvas no Rio Grande do Sul. Adicionalmente, observou-se uma interconexão global no sul do Globo entre o oeste do Oceano Índico, estendendo-se até o nordeste e leste da Austrália, depois até o Pacífico sul a leste de 120° W, e finalmente alcançando o sul do Brasil (Reboita et al., 2024). Estes fatores contribuíram para grandes chuvas nas bacias de montante e a ocorrência de vento Sudeste ao sul do estado contribuiu para a restrição de fluxo e barramento das águas, favorecendo o aumento do nível do Guaíba e prolongando a inundação (Collischonn et al., 2024).

- **Comparação dos Eventos Máximos:** Em 1941 a chuva geradora da cheia se distribuiu por 25 dias até o Guaíba atingir o pico, enquanto em 2024 isso ocorreu em 8 (oito) dias. Embora a comparação de dois eventos isolados não constitua, por si só, evidência de mudança climática, mostra-se coerente com o que a literatura indica: com o clima mais quente, há a maior capacidade de retenção de vapor da atmosfera (relação de Clausius-Clapeyron), e intensificação dos extremos de precipitação (Trenberth et al., 2003; Westra et al., 2013), isto é, chuvas mais intensas e de menor duração. A redução da duração da precipitação e o aumento da intensidade são indicadores das condições das mudanças climáticas. Comparando-se os eventos de 1941 e 2024 (iniciando em 07/04 em ambos os anos), observou-se grande semelhança de comportamento hidrológico, refletindo o efeito das chuvas na bacia e a restrição de escoamento nas lagoas a jusante. Na Figura 5 é apresentada a comparação dos eventos de cheia (precipitação e nível). Ambos os eventos mostraram uma lenta queda dos níveis (ao longo de 40 a 45 dias) devido aos limites de fluxo na conexão da Lagoa de Patos com o Oceano Atlântico e os efeitos do vento. Destaca-se que as elevações do nível d'água apresentadas

na Figura 5 estão referenciadas ao Cais Mauá-C6 (Doca 4), bem como representam locais diferentes de medição, portanto, com influência da linha d'água.

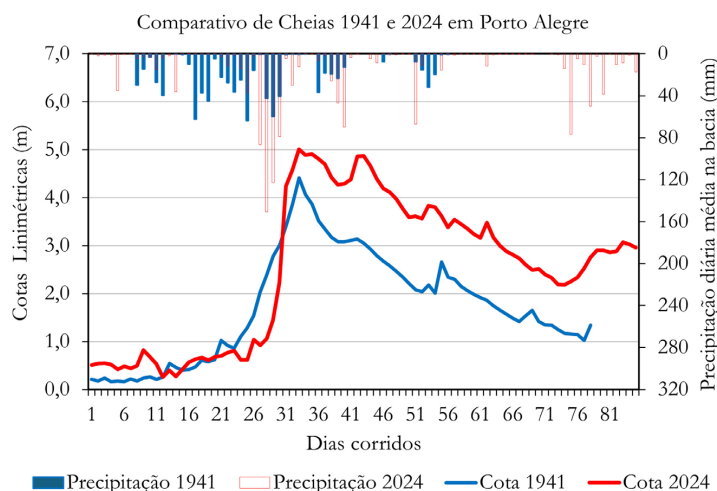


Figura 5. Precipitação na bacia do Guaíba e cotas linimétricas do Guaíba em Porto Alegre, nos eventos de 1941 e 2024. **Fonte:** atualizado de Silveira (2020), com cotas de 1941 obtidas da estação ANA 87450000 – Porto Alegre, e cotas de 2024 obtidas de ANA 87450004 – Cais Mauá C6 (até 02/05/2024) e ANA 87444000 – Usina do Gasômetro Cheia 2024 (a partir 03/05/2024).

AValiação DO RISCO

Princípios estatísticos

A avaliação estatística do risco de enchentes se baseia em três princípios (Tucci, 2002): (i) as séries são independentes; (ii) a amostra é representativa; e (iii) a amostra é estacionária. Não existe grande incerteza quanto ao princípio da *independência* dos valores, já que os valores são selecionados dentro do ano hidrológico e normalmente não apresentam correlação.

A representatividade da amostra e a *estacionariedade* se tornaram cada vez mais questionadas devido aos efeitos antrópicos sobre os sistemas hídricos como: urbanização, desmatamento ou reflorestamento, alterações do sistema hídrico com barragens, dique e canais, que podem mudar o comportamento das vazões no tempo nos trechos da bacia, além do efeito das mudanças climáticas. Nas últimas décadas este efeito sobre o clima tem sido cada vez mais crescente. Em 2023 e 2024 as temperaturas bateram recordes de aumento de 1,48°C e 1,55°C (World Meteorological Organization, 2024, 2025), respectivamente, em comparação ao período pré-industrial³ o que configura diferentes efeitos no ciclo hidrológico e mostra maior intensidade dos eventos extremos (Kundzewicz et al., 2014). O IPCC vem desenvolvendo uma sequência de relatórios apresentando cenários futuros e estimativas de mudança climática (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2026).

Por essa razão, foram aplicados testes estatísticos de autocorrelação e de tendência à série de níveis máximos anuais do Guaíba. A autocorrelação foi avaliada pelo teste de Durbin-Watson (Durbin & Watson, 1950). A tendência monotônica foi avaliada pelo teste de Mann-Kendall (Mann, 1945; Kendall, 1975); para reduzir a influência da dependência temporal e evitar a superestimação da significância estatística, a série foi previamente tratada pela técnica de *prewhitening*, baseada em um modelo autorregressivo de primeira ordem (von Storch, 1999). A magnitude da tendência foi estimada pelo estimador Sen's (1968) slope.

Distribuição de Gumbel

A aplicação da distribuição de Gumbel foi realizada sob condições estacionárias e não-estacionárias, tendo o tempo "t" como covariante, ou seja, a variável *t* é um parâmetro da distribuição. Seja uma série

³ Uma série é estacionária quando as estatísticas da distribuição de probabilidade não variam com o tempo, como média e desvio padrão.

de máximos anuais denotada por $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$, independente e identicamente distribuída, a função acumulada de Gumbel é dada por:

$$F(x; \mu, \sigma) = \exp \left\{ -\exp \left[-\frac{x - \mu}{\sigma} \right] \right\}, \quad \sigma > 0 \quad (1)$$

em que: μ é o parâmetro de localização, que descreve a posição da distribuição; σ é o parâmetro de escala, que descreve a dispersão da distribuição.

À distribuição de Gumbel foram consideradas 6 (seis) configurações dos parâmetros, numeradas de I a VI, em que a o tipo I corresponde ao modelo estacionário – em que os parâmetros estatísticos são constantes no tempo – e dos tipos II a VI correspondem aos modelos não-estacionários. A Tabela 2 apresenta as combinações adotadas neste estudo.

Tabela 2. Modelos de distribuição de Gumbel aplicados.

Distribuição	Parâmetros Gumbel		Número de parâmetros
	Localização	Escala	
Tipo I	μ	σ	2
Tipo II	$\mu_0 + \mu_1 \cdot t$	σ	3
Tipo III	$\mu_0 + \mu_1 \cdot t$	$\sigma_0 + \sigma_1 \cdot t$	4
Tipo IV	$\mu_0 + \mu_1 \cdot t$	$\exp(\sigma_0 + \sigma_1 \cdot t)$	4
Tipo V	μ	$\sigma_0 + \sigma_1 \cdot t$	3
Tipo VI	μ	$\exp(\sigma_0 + \sigma_1 \cdot t)$	3

Os parâmetros da distribuição de Gumbel foram obtidos pelo método da Máxima Verossimilhança (MMV), por possuir estimativas confiáveis e recomendações na literatura para séries de dados superiores a 25 (Katz et al., 2002), bem como permitir a inclusão de covariáveis (Katz, 2013). O log da verossimilhança derivado da Equação 1 é dado como:

$$\log V(\mu, \sigma | X) = -n \log \sigma - \sum_{i=1}^n \left(\frac{x_i - \mu}{\sigma} \right) - \sum_{i=1}^n \exp \left[-\left(\frac{x_i - \mu}{\sigma} \right) \right] \quad (2)$$

Obtidos os parâmetros das diferentes distribuições, foram aplicados métodos quantitativos de verificação dos ajustes. Inicialmente, aplicou-se o Critério de Informação Akaike (CIA), usualmente adotado para avaliação do melhor modelo com base nos resultados do ajuste da distribuição pelo MMV (Akaike, 1974; Katz, 2013). Seja um modelo de Gumbel com k parâmetros, o CIA do modelo é dado pela Equação 3:

$$CIA = -2 \log V + 2k \quad (3)$$

O modelo cujo valor de CIA for menor é classificado como melhor modelo.

Na sequência, aplicou-se o teste da Razão da Verossimilhança (RV) entre os modelos não-estacionário e o estacionário. Esse teste compara o ajuste de dois modelos aninhados, de modo a avaliar se a distribuição não-estacionária ajustada é significativamente superior à distribuição estacionária. A estatística de teste é calculada pela Equação 4:

$$D = 2 \left[-\log V_{\text{estacionário}} + \log V_{\text{não-estacionário}} \right] \quad (4)$$

Assumindo que D se aproxima de uma distribuição Qui-Quadrado com grau de liberdade igual à diferença entre o número de parâmetros dos modelos comparados, a significância estatística do modelo

não-estacionário foi medida pelo p-valor (Coles, 2001; Reiss & Thomas, 2007; Agilan & Umamahesh, 2015), a um nível de confiança de 95%.

Métodos de Estimativa do Risco

A determinação do risco do nível de enchente em Porto Alegre na bacia do Lago Guaíba foi obtida considerando a série histórica para uma distribuição de Gumbel estacionária e não-estacionária que melhor se ajustou aos dados. Foram calculados os intervalos de confiança pelo método normal, no qual assume-se a normalidade assintótica dos parâmetros e os erros-padrão dos níveis são obtidos por aproximação de primeira ordem via método delta (Coles, 2001). O método foi aplicado para um nível de confiança de 95%.

Todo o processo de estimativas dos parâmetros de distribuição de Gumbel, de avaliação de melhor modelo, de níveis de enchente e de intervalos de confiança foi realizado através do pacote *extRemes* 2.2-1 em ambiente *RStudio* (Gilleland, 2025).

RESULTADOS

A série de níveis máximos disponível possui 126 anos de dados, de 1899 a 2024, conforme apresenta a Figura 4.

- **Avaliação da Autocorrelação:** o teste de Durbin-Watson resultou em um p-valor igual a 0,002, indicando autocorrelação positiva.
- **Avaliação de Tendência:** após o *prewhitening*, o teste de Mann-Kendall resultou em p-valor igual a 0,012, com $\tau = 0,152$, caracterizando tendência crescente estatisticamente significativa. O estimador Sen's slope indicou aumento de 0,29 cm por ano no nível máximo anual do Guaíba. Tal tendência de crescimento pode ser verificada na Figura 4.
- **Avaliação da Estacionariedade:** Foram ajustadas as distribuições de probabilidade (estacionária e não-estacionárias), listadas na Tabela 2 acima. A Tabela 3 apresenta os resultados dos parâmetros bem como dos métodos de avaliação das distribuições (CIA e Teste RV).

Tabela 3. Resultados para as distribuições de Gumbel.

Distribuição	Parâmetros de Gumbel ¹		CIA	Teste RV p-valor
	Localização (m)	Escala (m)		
Tipo I	1,5127	0,4180	186,09	-
Tipo II	1,3524+2,6105E-3.t	0,4066	181,92	0,013
Tipo III	1,3476+2,6860E-3.t	0,3883 +2,8297E-4.t	183,77	0,043
Tipo IV	1,3473+2,6896E-3.t	exp(-0,9475 +7,4334E-4.t)	183,77	0,042
Tipo V	1,5138	0,42207-6,5637E-5.t	188,08	0,930
Tipo VI	1,5139	exp(-0,8617-1,7112E-4.t)	188,08	0,927

¹ t corresponde ao tempo, em anos, que vai de 1 a 126.

Conforme se observa na Tabela 3, a distribuição de Gumbel Tipo II, com apenas o parâmetro de localização variando no tempo, foi a que apresentou o menor CIA dentre os modelos. Os modelos Tipo III e IV e Tipo V e VI apresentaram CIA iguais, indicando similaridade entre eles. A partir do teste estatístico RV a Gumbel Tipo II também foi a que melhor se ajustou estatisticamente aos dados, quando comparado ao Gumbel Tipo I (estacionário). Os modelos Tipo III e IV tem p-valores menores que uma significância de 0,05, sendo também aceitáveis, mas o Tipo II, com p-valor 0,013, apresentou superioridade e menor complexidade na estimativa dos parâmetros. Dessa forma, foi utilizada a Gumbel Tipo II para estimativa final dos níveis máximos de cheia não-estacionário.

Na Figura 6 são apresentados os resultados dos ajustes das distribuições estacionária e não-estacionária para diferentes tempos de retorno e respectivos intervalos de confiança. Uma vez que para o modelo não-estacionário o t varia entre 1 e 126, os níveis de retorno apresentados na figura foram obtidos para t igual a 126. Conforme se observa na figura, o modelo não-estacionário se sobrepõe ao estacionário, sendo essa sobreposição mais evidente para tempos de retorno menores. O mesmo comportamento é verificado para a faixa dos intervalos de confiança, sombreados no gráfico.

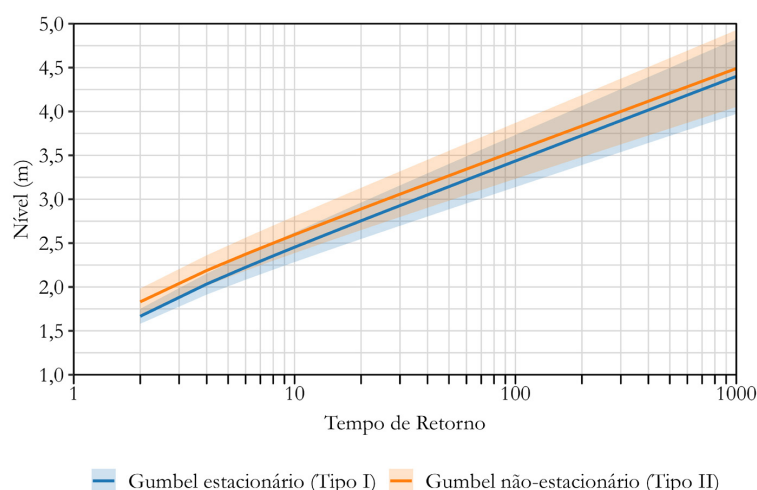


Figura 6. Níveis d'água em Porto Alegre, em metros, para diferentes tempos de retorno, usando os modelos Gumbel estacionário (Tipo I) e Gumbel não-estacionário (Tipo II), e respectivos intervalos de confiança.

Projeção do risco futuro

A projeção do risco futuro de enchente para o modelo estacionário não depende do tempo e é o mesmo para qualquer ano no futuro. Considerando a existência da tendência não-estacionária foi utilizado o modelo ajustado aos dados da série de níveis para estimar o risco de inundação para diferentes tempos de retorno para as décadas futuras.

Na Tabela 4 é apresentado um resumo dos resultados para os tempos de retorno da distribuição estacionária e da distribuição não-estacionária para alguns tempos de retorno e para algumas décadas entre 2030 e 2100, a partir da extrapolação da tendência. Observa-se, para o ajuste não-estacionário, um aumento crescente dos níveis ao longo das décadas para todos os tempos de retorno. Como o modelo Tipo II faz variar linearmente o parâmetro de localização, o incremento ao longo do tempo é o mesmo para todos os tempos de retorno — cerca de 0,18 m entre 2030 e 2100. Em relação ao cenário estacionário, o nível projetado para 2100 é superior em 0,29 a 0,34 m, sendo o acréscimo ligeiramente maior para os tempos de retorno menores; essa atenuação nos tempos de retorno mais altos decorre do menor parâmetro de escala do modelo não-estacionário. Para o tempo de retorno de 100 anos, os aumentos situam-se entre 3,8 e 9,0%, magnitude diretamente relevante para a definição da cota de coroamento dos diques. Por resultarem da extrapolação da tendência ajustada, essas projeções carregam incerteza crescente com o horizonte temporal, refletida no alargamento dos intervalos de confiança.

Tabela 4. Resultados comparativos de níveis máximos, em metros, referência Imbituba em Porto Alegre (valores arredondados).

Cenário	TR (anos)			
	10	50	100	500
Estacionário	2,45	3,14	3,44	4,11
Não-estacionário				
2030	2,61	3,28	3,57	4,22
2050	2,66	3,33	3,62	4,27
2075	2,73	3,40	3,68	4,34
2100	2,79	3,46	3,75	4,40

Na Figura 7 são apresentados os aumentos de níveis, para cada tempo de retorno, ao longo das décadas futuras simuladas, em comparação com os níveis estacionários. Para cada tempo de retorno, o aumento do nível em relação ao cenário estacionário cresce de forma aproximadamente linear ao longo das décadas, passando de cerca de 0,11 a 0,16 m em 2030 para 0,29 a 0,34 m em 2100. A linearidade

reflete a variação linear do parâmetro de localização do modelo Tipo II, e a proximidade entre as curvas dos diferentes tempos de retorno confirma que o incremento depende pouco do tempo de retorno.

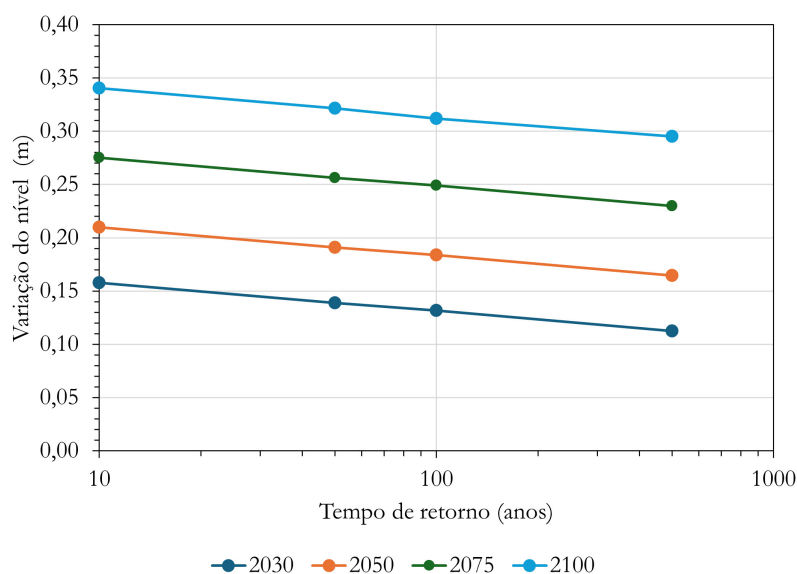


Figura 7. Variação dos níveis máximos anuais, em metros, para cada tempo de retorno para as próximas décadas.

CONCLUSÃO

Este estudo avaliou o risco futuro de cheias em Porto Alegre a partir da série de níveis máximos anuais do Lago Guaíba (1899–2024), ajustando distribuições de Gumbel estacionárias e não-estacionárias. A série apresentou tendência crescente estatisticamente significativa e o modelo não-estacionário mostrou desempenho superior ao estacionário pelos critérios de informação de Akaike e pelo teste da razão de verossimilhança.

As estimativas indicaram aumento progressivo dos níveis associados a cada tempo de retorno, da ordem de 30 cm até 2100 em relação ao cenário estacionário. Para o tempo de retorno de 100 anos, referência usual em projetos de proteção, o nível estimado para 2100 supera em cerca de 9% o valor estacionário, magnitude relevante para a definição da cota de coroamento dos diques de Porto Alegre.

Com base nestes resultados, nesta conclusão, são respondidas as perguntas apresentadas no início deste artigo e que motivaram a realização dele:

A série hidrológica existente, que é de 1899 a 2024, é representativa do comportamento futuro das enchentes?

Trata-se de uma série longa e amostralmente importante, que permite identificar tendências recentes de alteração climática. Contudo, não traz todas as informações para projetar o risco futuro com segurança, uma vez que não incorpora nos seus dados o antropismo futuro sobre o planeta. Caso houvesse estabilização das condições climáticas e nas ações antrópicas, os resultados apresentados neste artigo podem ser adequados, porém esse cenário não parece ser a realidade futura.

O risco e sua incerteza de estimativa podem ser considerados permanentes quando existe tendência de alteração no tempo das condições climáticas?

Os resultados indicam que, sob condições não-estacionárias de precipitação na bacia, o risco estimado e sua incerteza associada variam ao longo do tempo, não podendo ser consideradas permanentes. Para uma avaliação mais robusta tanto para estimativa do risco e a redução da incerteza, é necessário complementar a análise estatística.

Este trabalho foi realizado sob algumas premissas. A principal é a de que a tendência observada na série de níveis de 1899 a 2024 é representativa da não-estacionariedade futura, de modo que sua extrapolação até 2100 reproduz o comportamento esperado; assume-se, ainda, que essa não-estacionariedade é adequadamente descrita pela variação linear do parâmetro de localização da distribuição de Gumbel Tipo II. A análise baseou-se nos níveis máximos e não incorporou explicitamente cenários climáticos. Portanto, trabalhos futuros devem considerar a avaliação do risco a partir de cenários futuros de precipitação e, a partir de modelagem hidrológica, vazão, em complemento à extrapolação estatística.

AGRADECIMENTOS

O conteúdo deste artigo foi desenvolvido pela Rhama Analysis no âmbito do Projeto “Avaliação e Recuperação do Sistema de Proteção Contra Cheias de Porto Alegre”, de propriedade do Departamento Municipal de Água e Esgotos (DMAE) da Prefeitura Municipal de Porto Alegre.

REFERÊNCIAS

- Agilan, V., & Umamahesh, N. V. (2015). Detection and attribution of non-stationarity in intensity and frequency of daily and 4-h extreme rainfall of Hyderabad, India. *Journal of Hydrology*, 530, 677-697. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.10.028>
- Akaike, H. (1974). A new look at the statistical model identification. In E. Parzen, K. Tanabe & G. Kitagawa (Eds.), *Selected papers of Hirotugu Akaike* (Springer Series in Statistics). New York: Springer. https://doi.org/10.1007/978-1-4612-1694-0_16.
- Bartiko, D., Chaffe, P. L. B., & Bonumá, N. B. (2017). Non-stationarity in maximum annual daily streamflow series from Southern Brazil. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, 22, e48. <https://dx.doi.org/10.1590/2318-0331.0217170054>.
- Brasil. Departamento Nacional de Obras de Saneamento. (1968). *Estudo de viabilidade técnico-econômica das obras de defesa de Porto Alegre, Canoas e São Leopoldo contra inundações*. Porto Alegre.
- Brasil. (2024). *Nota Institucional Conjunta – SGB e ANA: monitoramento das cheias no Rio Grande do Sul em 2024 e Readequações na Estação Usina do Gasômetro*. Brasília. Recuperado em 29 de dezembro de 2025, de <https://www.gov.br/ana/pt-br/assuntos/noticias-e-eventos/noticias/ana-e-servico-geologico-do-brasil-fazem-readequacoes-em-estacao-de-monitoramento-do-rio-guaiba-em-porto-alegre-rs/nota-institucional-conjunta-ana-sgb-gasometro-final.pdf>
- Clarke, R. T. (2013). How should trends in hydrological extremes be estimated? *Water Resources Research*, 49(10), 6756-6764. <https://doi.org/10.1002/wrcr.20485>
- Coles, S. (2001). *An introduction to statistical modeling of extreme values* (221 p.). New York: Springer.
- Collischonn, W., Fan, F. M., Possantti, I., Dornelles, F., Paiva, R., Medeiros, M. S., Michel, G. P., Magalhães Filho, F. J. C., Moraes, S. R., Marcuzzo, F. F. M., Michel, R. D. L., Beskow, T. L. C., Beskow, S., Fernandes, E. H. L., Santos, L. L., Ruhoff, A., Kobiyama, M., Collares, G. L., Buffon, F., Duarte, E., Lima, S., Meirelles, F. S. C., & Picilli, D. G. A. (2024). The exceptional hydrological disaster of April-May 2024 in southern Brazil. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, 30, e1. <https://doi.org/10.1590/2318-0331.302520240119>.
- Comissão Econômica para a América Latina e o Caribe – CEPAL. Nações Unidas Brasil. Ministério da Integração e Desenvolvimento Regional. Governo do Estado do Rio Grande do Sul. Grupo Banco Mundial. Banco Interamericano de Desenvolvimento. (2024). *Avaliação dos efeitos e impactos das inundações no Rio Grande do Sul*. Recuperado em 21 de dezembro de 2025, de <https://drive.google.com/file/d/1Pk7ooxbNfRpQ5K8tOgSVmJrjO7Pkmwao/view>
- Durbin, J., & Watson, G. S. (1950). Testing for serial correlation in least squares regression I. *Biometrika*, London, v.37, n.3/4, pp. 409-428. DOI: <https://doi.org/10.1093/biomet/37.3-4.409>.
- Germano, A. O., Lambert, D., Silva, E. D., Buffon, F. T., & Pedrollo, M. C. R. (2024). *Avaliação indireta do nível máximo das águas do delta do Jacuí na região central de Porto Alegre, entre as estações Cais Mauá C6 e Usina do Gasômetro, na grande cheia de maio de 2024*. Brasília: Serviço Geológico do Brasil. Recuperado em 29 de dezembro de 2025, de <https://rigeo.sgb.gov.br/handle/doc/24911>
- Gilleland, E. (2025). *Package ‘extRemes’, version 2.2-1. Extreme value analysis*. Recuperado em 23 de fevereiro de 2026, de <https://cran.r-project.org/web/packages/extRemes/extRemes.pdf>
- Intergovernmental Panel on Climate Change – IPCC. (2026). Recuperado em 29 de dezembro de 2025, de <https://www.ipcc.ch/sr15/>
- Katz, R. W. (2013). Statistical methods for nonstationary extremes. In A. AghaKouchak, A. D. Easterling, K. H. S. Schubert & S. Sorooshian (Eds.), *Extremes in a changing climate: detection, analysis and uncertainty* (pp. 15-37). London: Springer. https://doi.org/10.1007/978-94-007-4479-0_2.
- Katz, R. W., Parlange, M. B., & Naveau, P. (2002). Statistics of extremes in hydrology. *Advances in Water Resources*, 25(8-12), 1287-1304. [https://doi.org/10.1016/S0309-1708\(02\)00056-8](https://doi.org/10.1016/S0309-1708(02)00056-8)
- Kendall, M. G. (1975). *Rank correlation methods*. London: Griffin.
- Kundzewicz, Z. W., Kanae, S., Seneviratne, S. I., Handmer, J., Nicholls, N., Peduzzi, P., Mechler, R., Bouwer, L. M., Arnell, N., Mach, K., Muir-Wood, R., Brakenridge, G. R., Kron, W., Benito, G., Honda, Y., Takahashi, K., & Sherstyukov, B. (2014). Flood risk and climate change: global and regional perspectives. *Hydrological Sciences Journal*, 59(1), 1-28. <https://doi.org/10.1080/02626667.2013.857411>
- Lopes, V. A. R., Fan, F. M., Pontes, P. R. M., Siqueira, V. A., Collischonn, W., & Marques, M. (2018). A first integrated modelling of a river-lagoon large-scale hydrological system for forecasting purposes. *Journal of Hydrology*, 565, 177-196. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.08.011>
- Mann, H. B. (1945). Nonparametric tests against trend. *Econometrica*, 13(3), 245-259. <https://doi.org/10.2307/1907187>
- Milly, P. C. D., Betancourt, J., Falkenmark, M., Hirsch, R. M., Kundzewicz, Z. W., Lettenmaier, D. P., & Stouffer, R. J. (2008). Stationarity is dead: whither water management? *Science*, 319(5863), 573-574. <https://doi.org/10.1126/science.1151915>

- National Oceanic and Atmospheric Administration – NOAA. (2026). *AMO (Atlantic Multidecadal Oscillation) Index*. Recuperado em 20 de fevereiro de 2026, de <https://psl.noaa.gov/data/timeseries/AMO/>
- Olsen, J. R., Lambert, J. H., & Haimes, Y. Y. (1998). Risk of extreme events under nonstationary conditions. *Risk Analysis: An Official Publication of the Society for Risk Analysis*, 18(4), 497-510. <https://doi.org/10.1111/j.1539-6924.1998.tb00364.x>
- Organização das Nações Unidas – ONU. (2024). *Chuvas ligadas ao El Niño e à mudança climática arrasam o Sul do Brasil*. Recuperado em 20 de fevereiro de 2026, de <https://news.un.org/pt/story/2024/05/1831311#:~:text=0%20per%C3%ADodo%20entre%20o%20final,o%20Rio%20Grande%20do%20Sul>
- Paiva, R. C. D., Collischonn, W., Miranda, P., Petry, I., Dornelles, F., Goldenfum, J. A., Fan, F. M., Ruhoff, A., & Fagundes, F. (2024a). *Critérios hidrológicos para adaptação à mudança climática: Chuvas e cheias extremas na Região Sul do Brasil* (Nota Técnica, pp. 1-14). Porto Alegre: UFRGS. Recuperado em 9 de maio de 2026, de <https://www.ufrgs.br/iph/wp-content/uploads/2024/05/CriteriosAdaptacaoMudancaClimaticaChuvasCheiasExtremasSul.pdf>
- Paiva, R. C. D., Fan, F., Sampaio, M., Dornelles, F., Goldenfum, J., Laipelt, L., & Risso, A. (2024b). *Sobre a referência de níveis d'água no monitoramento do Guaíba* (Nota Técnica, pp. 1-2). Porto Alegre: UFRGS. Recuperado em 20 de fevereiro de 2026, de <https://www.ufrgs.br/iph/nota-tecnica-sobre-a-referencia-de-niveis-dagua-no-monitoramento-do-guaiba/>
- Porto Alegre Airport. (2025). Recuperado em 20 de fevereiro de 2026, de <https://portoalegre-airport.com.br/pt/novos-negocios>
- Possa, T. M., Collischonn, W., Jardim, P. F., & Fan, F. M. (2022). Hydrological-hydrodynamic simulation and analysis of the possible influence of the wind in the extraordinary flood of 1941 in Porto Alegre. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, 27, e29. <http://doi.org/10.1590/2318-0331.272220220028>
- Reboita, M. S., Mattos, E. V., Capucin, B. C., Souza, D. O., & Ferreira, G. W. S. (2024). A multi-scale analysis of the extreme precipitation in Southern Brazil in april/may 2024. *Atmosphere*, 15(9), 1123. <https://doi.org/10.3390/atmos15091123>
- Reiss, R.-D., & Thomas, M. (2007). *Statistical analysis of extreme values: with applications to insurance, finance, hydrology and other fields* (3rd ed.). Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-7643-7399-3>
- Salas, J. D., & Obeysekera, J. (2014). Revisiting the concepts of return period and risk for nonstationary hydrologic extreme events. *Journal of Hydrologic Engineering*, 19(3), 554-568. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HE.1943-5584.0000820](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0000820)
- Sen, P. K. (1968). Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau. *Journal of the American Statistical Association*, 63(324), 1379-1389. <https://doi.org/10.1080/01621459.1968.10480934>
- Serinaldi, F., & Kilsby, C. G. (2015). Stationarity is undead: uncertainty dominates the distribution of extremes. *Advances in Water Resources*, 77, 17-36. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2014.12.013>
- Silva, D. F., Goldenfum, J. A., Simonovic, S. P., & Dornelles, F. (2023). Impacts of climate change on the intensity-duration-frequency curves of two urbanized areas in Brazil using the high-resolution Eta atmospheric model. *Urban Water Journal*, 20(2), 123-139. <https://doi.org/10.1080/1573062X.2022.2155848>
- Silveira, A. L. L. (2020). Chuvas e vazões da grande enchente de 1941 em Porto Alegre-RS. *Boletim Geográfico do Rio Grande do Sul*, (35), 69-90. Recuperado em 20 de fevereiro de 2026, de <http://hdl.handle.net/10183/217187>
- SOS Enchentes. (2025). *Situação nos municípios*. Recuperado em 21 de dezembro de 2025, de <https://sosenchentes.rs.gov.br/situacao-nos-municipios>
- Trenberth, K. E., Dai, A., Rasmussen, R. M., & Parsons, D. B. (2003). The changing character of precipitation. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 84(9), 1205-1217. <https://doi.org/10.1175/BAMS-84-9-1205>
- Tucci, C. E. M. (2002). *Regionalização de vazões*. Porto Alegre: ABRH.
- von Storch, H. (1999). Misuses of statistical analysis in climate research. In H. von Storch & A. Navarra (Eds.), *Analysis of climate variability*. Berlin: Springer.
- Westra, S., Alexander, L. V., & Zwiers, F. W. (2013). Global increasing trends in annual maximum daily precipitation. *Journal of Climate*, 26(11), 3904-3918. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-12-00502.1>
- World Meteorological Organization – WMO. (2024). *WMO confirms that 2023 smashes global temperature record*. Recuperado em 20 de fevereiro de 2026, de <https://wmo.int/news/media-centre/wmo-confirms-2023-smashes-global-temperature-record>
- World Meteorological Organization – WMO. (2025). *WMO confirms 2024 as warmest year on record at about 1.55°C above pre-industrial level*. Recuperado em 20 de fevereiro de 2026, de <https://wmo.int/news/media-centre/wmo-confirms-2024-warmest-year-record-about-155degc-above-pre-industrial-level>
- Yang, Q., Zheng, X., Jin, L., Lei, X., Shao, B., & Chen, Y. (2021). Research progress of urban floods under climate change and urbanization: a scientometric analysis. *Buildings*, 11(12), 628. <https://doi.org/10.3390/buildings11120628>

Contribuições dos autores:

Daniele Feitoza Silva: organização, análise de dados, análise não-estacionária, análise formal, escrita, revisão.

Carlos Eduardo Morelli Tucci: organização, análise formal, escrita, revisão, supervisão.

André Luiz Lopes da Silveira: coleta e análise de dados, análise formal, escrita, revisão.

Paola Marques Kuele: coleta e análise de dados, escrita, revisão.

Rodrigo Biz Willig: coleta e análise de dados, escrita, revisão.

Caetano Coelho Silva Fraga: escrita, revisão.

Bruno Kerwald Schneider: escrita, revisão.