



Instituto de Pesquisas Hidráulicas
Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Nota Técnica

Critérios hidrológicos para adaptação à mudança climática: Chuvas e cheias extremas na Região Sul do Brasil

Rodrigo Paiva*, Walter Collischonn, Pedro Miranda, Ingrid Petry, Fernando Dornelles,
Joel Goldenfum, Fernando Fan, Anderson Ruhoff e Hugo Fagundes

*rodrigo.paiva@ufrgs.br

27 de maio de 2024

Introdução

O evento hidrológico extremo de maio de 2024 atingiu direta e indiretamente uma população de aproximadamente 2,3 milhões de pessoas no RS. De acordo com dados mais atualizados da Defesa Civil do RS, quase 600 mil pessoas foram desalojadas, 70 mil foram para abrigos, cerca de 800 ficaram feridas e mais de 150 óbitos foram confirmados.

Além disso, muitas outras pessoas foram atingidas de forma indireta, já que as infraestruturas de transportes, de comunicação e de serviços de fornecimento de água e energia elétrica foram afetadas pelas águas, tiveram que ser interrompidas ou foram destruídas.

Foram reportados no boletim do governo de atualização dos serviços de infraestrutura do RS, que durante o evento houve mais de duas centenas de pontos de interrupção de tráfego em rodovias federais e estaduais, diversos deles por quedas de pontes atingidas pela cheia. Além disso, o transporte ferroviário na Região Metropolitana de Porto Alegre foi completamente interrompido e, tão ou mais grave, o fechamento total do aeroporto Salgado Filho por tempo indeterminado devido à inundação.

As chuvas do evento de maio de 2024 tiveram extremo volume e intensidade em curto intervalo de tempo e grande abrangência espacial. Foram observados nos pluviógrafos da ANA, CEMADEN e INMET acumulados de mais de 400 mm em menos de 2 semanas, superiores a 700 mm em muitas regiões e maiores de 1000 mm alguns casos. Em muitos locais, neste curto intervalo de tempo, choveu cerca de 40% do volume médio anual. Estas precipitações elevadas causaram cheias rápidas com grande elevação de níveis e velocidade na região da serra, inundação com grande extensão espacial e elevada duração (semanas) na Região Metropolitana de Porto Alegre, além de inúmeros movimentos de massa.

O evento hidrológico de maio de 2024 foi uma cheia recorde em diversos rios do RS, especialmente naqueles que drenam para o sistema do rio Guaíba e Laguna dos Patos, como os rios Pardo, Taquari, Caí e Sinos. As cheias recordes nestes tributários, somadas à própria cheia do rio Jacuí, que também marcou um recorde, resultaram na maior cheia da história no rio Guaíba, em Porto Alegre.

Embora tenha sido o evento de maior magnitude, constituindo, possivelmente, o maior evento de inundação da história do Brasil, o evento de maio de 2024 não ocorreu de forma isolada no tempo. Apenas 8 meses antes, em setembro de 2023, o rio Taquari-

Antas já havia atingido o seu novo recorde, desde as cabeceiras do rio das Antas até a cidade de Bom Retiro do Sul (Moraes et al., 2024). Neste mesmo evento de setembro de 2023, foi registrada uma vazão máxima superior à vazão decamilenar estimada para o dimensionamento da barragem da UHE Castro Alves, no rio das Antas, na cabeceira do rio Taquari.

Apenas dois meses depois, em novembro de 2023, um novo evento resultou em cheias em diversos rios da região. Nesta ocasião, o rio Guaíba, em Porto Alegre, atingiu a cota 3,46 m, constituindo até aquele momento a segunda maior marca da história. Novamente a UHE Castro Alves registrou valores de vazão superiores à vazão decamilenar.

Finalmente, no evento de maio de 2024 foram registradas vazões próximas ou superiores à vazão de projeto em diversos empreendimentos hidrelétricos nos rios Jacuí (UHE Dona Francisca), Forqueta (PCH Salto do Forqueta), e Antas (usinas do CERAN, incluindo a UHE Castro Alves) segundo divulgação da Agência Nacional de Energia Elétrica. Estas vazões de projeto foram estimadas com base em análise estatística de vazões máximas, supondo o Tempo de Retorno (*TR*) de 10 mil anos.

As vazões máximas na cheia de 2024 foram extremamente elevadas e alcançaram valores equivalentes a recordes globais. A curva de Creager et al. (1945) apresenta uma envoltória de recordes globais para diferentes tamanhos de bacias. E, por exemplo, pelas observações e estimativas do momento, as vazões no Guaíba, Taquari-Antas e Jacuí foram 89%, 93% e 62% dos máximos globais, respectivamente. A curva envoltória de Creager fornece uma estimativa da vazão máxima esperada em função da área de drenagem e teve como base um grande número de cheias excepcionais de rios dos Estados Unidos da América e de algumas cheias para rios em outros países, incluindo o rio Amazonas. Ou seja, como os valores encontrados foram próximos dos máximos das curvas, entende-se que estes eventos se aproximam dos máximos excepcionais de referência.

Em Porto Alegre, no rio Guaíba, a cota de 3,00 metros foi superada apenas 4 vezes nos 124 anos entre 1899 e 2023. Mais recentemente, no período de setembro de 2023 a maio de 2024, já ocorreram 3 episódios em que o nível da água do rio Guaíba superou os 3,00 metros no cais no centro de Porto Alegre, sendo o maior deles em 2024. No rio Taquari, em Lajeado, 7 das 9 maiores cheias registradas no histórico de 1939 a 2024 ocorreram no período posterior ao ano 2000. Além disso, as três maiores cheias da história aconteceram nos 8 meses entre setembro de 2023 e maio de 2024 (Moraes et al., 2024).

Da mesma forma, em boa parte da região Sul, existem indícios de que as vazões máximas dos rios apresentam tendência de aumento nas últimas décadas (Chagas et al., 2022). Este aumento da frequência e magnitude dos eventos de vazões máximas na região Sul está de acordo com projeções de impactos da mudança climática na hidrologia do Brasil, conforme resultados de projeto de pesquisa desenvolvido pelo Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) financiado pela Agência Nacional de Águas de Saneamento Básico (ANA) (Paiva et al., 2024a), além de outras pesquisas como a desenvolvida por Brêda et al. (2023).

Neste momento em que se discute a reconstrução da infraestrutura do RS, é fundamental levar em conta que o histórico do passado não necessariamente serve de base confiável para estimar a magnitude dos eventos extremos que poderão ocorrer ao longo do século XXI, ou seja, a premissa da estacionariedade estatística deve ser revista. A situação exige que se reconstrua rapidamente, mas as evidências recentes sugerem que é necessário reconstruir melhor para evitar a repetição de grandes impactos negativos dos eventos extremos.

Neste sentido, esta nota técnica apresenta uma proposta de critérios relativamente simples para a estimativa atualizada de variáveis hidrológicas como precipitações intensas, vazões máximas, cotas máximas, velocidade d'água e inundação máxima, a serem utilizadas em projetos de infraestrutura e no planejamento, com uma visão para o século XXI com as necessárias adaptações de estudo hidrológicos para os prováveis efeitos das mudanças climáticas.

Em resposta aos riscos associados aos eventos extremos, estimativas atualizadas são fundamentais para o planejamento, a concepção de infraestruturas, a definição de áreas de risco, de prêmios de seguro e do planejamento de resposta a emergências.

Objetivo

Apresentar **critérios hidrológicos** para **adaptação à mudança climática**, relacionada a **chuvas e cheias extremas**, para aplicações em projetos de infraestrutura, mapeamento de áreas de risco e planejamento durante e após a recuperação dos desastres de 2023 e 2024 na **região Sul** do Brasil.

Critérios

Os **critérios** foram definidos a partir de quatro **princípios norteadores** com base nas evidências de projeções de impactos da mudança climática e observação dos eventos extremos recentes:

1. As **séries temporais** dos dados usados para as análises estatísticas de eventos hidrológicos extremos devem ser **longas**. As análises devem considerar a máxima extensão temporal de dados disponível na região de interesse.
2. A fim de levar em conta os **extremos hidrológicos recentes** e maiores valores do registro histórico, além de **tendências de alteração**, os eventos extremos mais atuais devem ser incluídos na série temporal a ser utilizada na análise. Isto inclui, no RS, os eventos de 2023 e 2024.
3. **Projetos** de infraestrutura ou planejamento de **grande porte**, para os quais são adotados, usualmente, Tempos de Retorno de 50 anos ou mais, devem ser **capazes de superar a maior cheia do histórico**, independentemente do Tempo de Retorno estimado para esta cheia.
4. O **impacto** da **mudança climática** deverá ser representado por um aumento na magnitude ou por uma alteração na frequência do evento, na forma descrita a seguir.

Para a definição de valores extremos de referência das variáveis hidrológicas, como precipitações intensas, vazões máximas, cotas máximas, velocidade d'água e área de inundação máxima, recomenda-se o seguinte **procedimento**:

1. Para realizar a análise estatística da série temporal de valores máximos deve ser considerada a **máxima extensão temporal** disponível na região e devem ser incluídos os eventos extremos mais atuais e mais importantes, como os que resultaram nas cheias de **1941, 2023 e 2024 no RS**. No caso de cotas e vazões, e na situação de ausência de registros sistemáticos das cheias mais importantes nos postos fluviométricos utilizados para a análise estatística, devem ser considerados registros não sistemáticos baseados em **marcas de cheia**. No caso de precipitações intensas e utilização de curvas intensidade-duração-frequência (idf), deve-se utilizar a **curva idf** mais **atualizada** na área de interesse.
2. A fim de considerar projeções do impacto da **mudança climática** (ver Anexo 1), deve-se calcular a variável de interesse considerando o critério mais restritivo entre os itens a seguir:

2.1. Aumento da magnitude: A magnitude da precipitação intensa ou da vazão máxima estimada com base no histórico passado para o Tempo de Retorno pretendido no estudo/projeto deve ser aumentada pelos fatores conforme a tabela abaixo:

Tabela 1. Fatores de aumento da magnitude da precipitação e vazão máxima

Tempo de Retorno	Precipitação máxima	Vazão máxima
até 10 anos	15 %	15 %
maior que 10 anos	20%	20%

2.2. Aumento na frequência de eventos extremos: O Tempo de Retorno (*TR*) adotado para estimar variáveis com base no histórico passado deve ser majorado em relação ao pretendido para o futuro no estudo/projeto conforme a tabela abaixo:

Tabela 2. Alteração no Tempo de Retorno (*TR*) adotado devido a mudança climática para pequenas e grandes bacias.

<i>TR</i> de projeto (anos)	<i>TR</i> a ser adotado (anos)	
	<i>A</i> < 1000 km ²	<i>A</i> > 1000 km ²
2	3	3
5	12	10
10	25	20
25	75	60
50	200	150
100	450	350
200	1000	800
500	3500	2500
1000	8000	6000

**A* é a área de drenagem.

Deve ser adotado o maior valor entre os estimados nos itens 2.1 e 2.2.

- Em projetos para os quais se adotam Tempos de Retorno ***TR* ≥ 50 anos**, e caso o valor encontrado no item 2 seja inferior ao maior evento do histórico, deve-se adotar o valor do maior evento do histórico.

Considerações finais

A aplicação dos critérios hidrológicos apresentados nesta nota técnica possibilita a adaptação da infraestrutura, da gestão de risco e do planejamento aos impactos mudança climática nas chuvas e cheias extremas no Sul do Brasil. Sugere-se que os critérios apresentados neste documento sejam revisados na medida que estejam disponíveis projeções de mudanças climáticas atualizadas e respectivos estudos de impactos sobre a hidrologia. Além disso, recomenda-se que os projetos de infraestrutura e o planejamento sejam adaptáveis e flexíveis, e que facilitem ou não inviabilizem sua ampliação (e.g. largura de pontes, seções de bueiros, cota de coroamento de barragens e diques), possibilitando assim considerar futuros aumentos dos valores de referência, dado um certo risco associado aos eventos hidrológicos extremos.

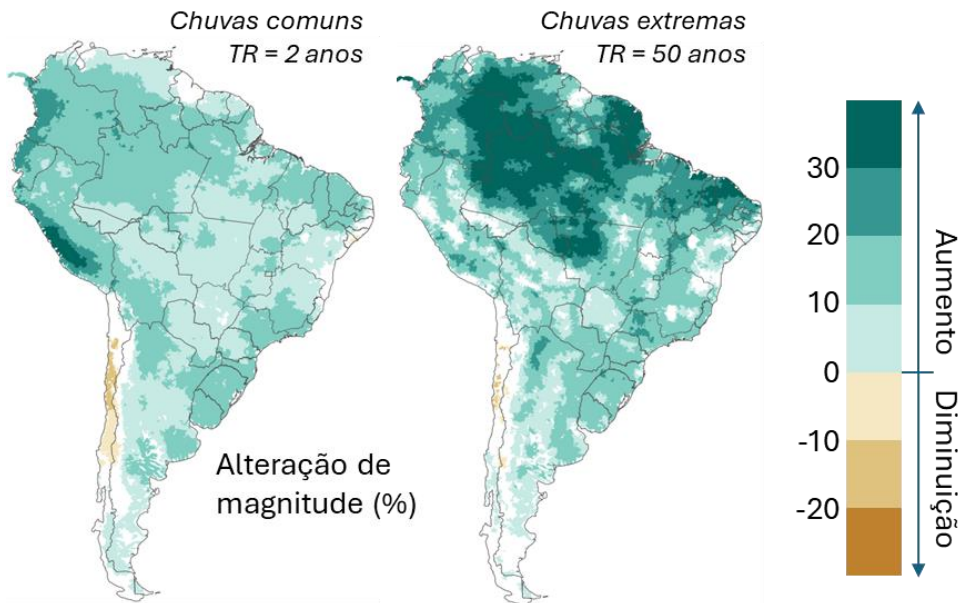
Anexo 1: Metodologia para a estimativa dos impactos da mudança climática

Os valores apresentados nas Tabelas 1 e 2 foram obtidos a partir de resultados do projeto “Cooperação em Tecnologias para Análises Hidrológicas em Escala Nacional - CLIMA: Impactos de Mudanças Climáticas em Extremos de Vazão (Cheias e Estiagens)” desenvolvido pelo IPH-UFRGS para ANA entre 2022 e 2024. Neste estudo, foram desenvolvidas projeções de impactos da mudança climática nas precipitações e vazões máximas dos rios da América do Sul, apresentadas em publicações de Paiva et al. (2024a), Miranda et al. (2024) e Petry et al. (2023). A fim de considerar as projeções mais atuais e suas incertezas, foram utilizados resultados de 28 modelos climáticos globais (GCMs) do CMIP6 usados no Sexto Relatório de Avaliação (AR6) do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC). O modelo hidrológico MGB (Modelo de Grandes Bacias) foi utilizado para simular as vazões nos rios da América do Sul. Foi considerado o cenário intermediário de emissões de gases de efeito estufa (SSP2-4.5), que considera níveis de emissão estáveis até 2050 e posterior diminuição até 2100. Para estimar os fatores de modificação da magnitude e da frequência de chuvas e vazões máximas, as projeções para o período futuro, considerando a janela temporal entre 2050 e 2100, foram comparadas com o período histórico, definido como a janela temporal entre 1965 e 2015.

Os resultados obtidos neste projeto mostram na Figura 1 que, no Brasil, os rios da região Sul e Uruguai, incluindo o rio Paranapanema e seus afluentes, excluindo o rio Paraná (Figura 2), terão aumentos da magnitude e da frequência de vazões máximas. Este resultado é coerente com observações de tendências recentes (e.g. Chagas et al., 2022) e estudos anteriores (e.g. Brêda et al., 2023). Os resultados deste projeto também mostram que no sul do Brasil há uma sensibilidade neutra entre aumentos de precipitação da tormenta e vazões de cheia, ou seja, um aumento de 1% na magnitude da precipitação intensa causaria aumento de aproximadamente 1% na vazão máxima (Paiva et al., 2024b).

Impacto da mudança climática

Precipitação máxima



Vazão Máxima

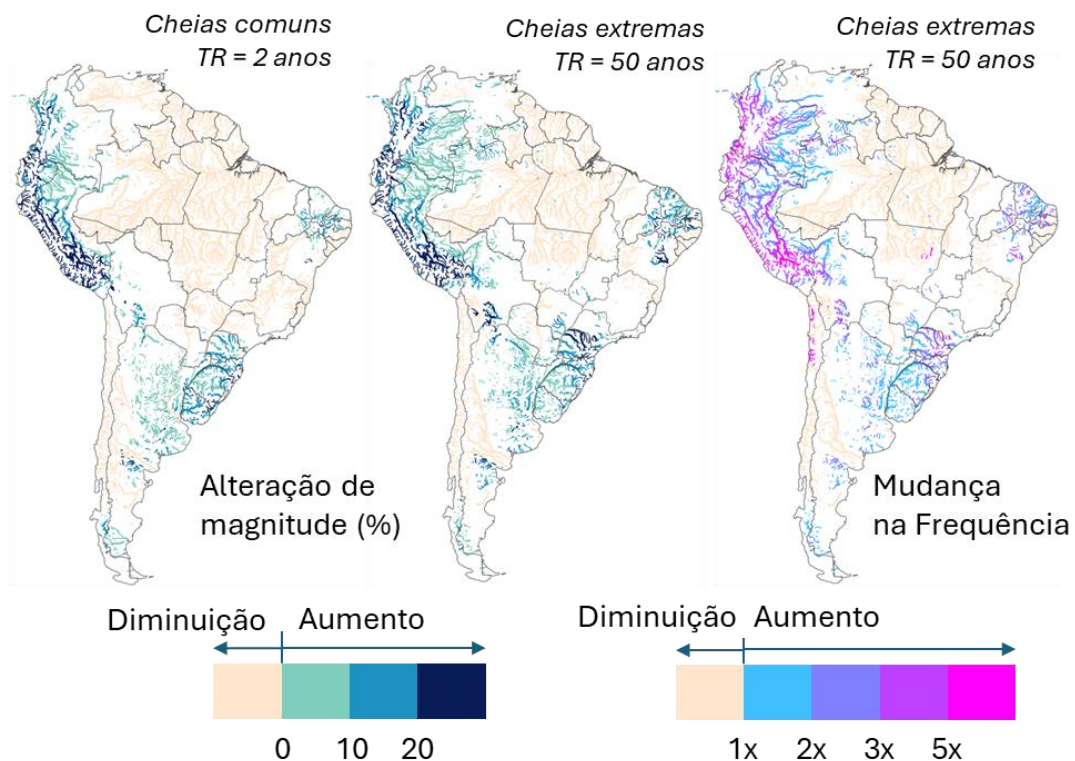


Figura 1. Projeções de impacto da mudança climática na magnitude e frequência da precipitação máxima diária e vazão máxima nos rios na América do Sul. Comparação entre período futuro (2050 a 2100) e histórico (1965 a 2015) considerando a mediana dos resultados

do modelo hidrológico MGB forçado com 28 modelos climáticos globais (cor neutra indica não concordância entre modelos) e o cenário intermediário SSP2-4.5.

Para obter informações para a Tabela 2, a alteração de extremos hidrológicos em bacias menores ($A < 1000 \text{ km}^2$) foi analisada com base na alteração nas precipitações intensas com 1 dia de duração na escala do pixel da grade dos GCMs. Em bacias maiores ($A > 1000 \text{ km}^2$), foram consideradas alterações nas vazões máximas nos rios simulados pelo modelo MGB (Modelo de Grandes Bacias). As precipitações e vazões e máximas anuais de cada local e GCM foram estudadas por meio de análise de frequência com a distribuição de probabilidades de Gumbel, ajustada para os períodos histórico e futuro. Inicialmente, foram calculadas as alterações de vazões máximas de diferentes Tempos de Retorno (TR) em cada trecho de rio, considerando cada um de 28 modelos climáticos. A seguir, para resumir o impacto da mudança climática sobre as vazões máximas em cada trecho, foi obtida a mediana dos resultados dos 28 GCMs em cada trecho de rio para cada tempo de retorno. E, finalmente, para resumir o impacto em toda a região, foram obtidos os percentis 25%, 50% e 75% dos resultados individuais em cada trecho (Figura 2). O procedimento foi repetido para estimar a alteração da magnitude das vazões máximas e das chuvas máximas de 1 dia de duração. Além disso, foram obtidos resultados de aumento da frequência das vazões máximas e precipitações máximas de 1 dia de duração. Para isso, foram calculados quais seriam os novos Tempos de Retorno no futuro das vazões e precipitações máximas do período histórico. A partir deste resultado, pode ser extraído qual deve ser o Tempo de Retorno a ser adotado em estimativas com base nas estatísticas do histórico que resulte em um Termo de Retorno e risco pretendido para projeto ou estudo visando o futuro. Para definir os valores da Tabela 1, que indicam a alteração na magnitude a ser aplicada, adotou-se o percentil 50% para sintetizar os resultados dos GCMs, e 75% para os resultados na área analisada, correspondente a linha azul tracejada nos painéis superiores da Figura 2. Nota-se que as alterações de magnitude da precipitação máxima diária e vazão máxima são da ordem de 15% para eventos menores de baixos tempos de retorno e chegam a 20% para os maiores. A Tabela 2 indica qual deve ser o Tempo de Retorno a ser adotado em estimativas baseadas no histórico passado que resultaria em um determinado Tempo de Retorno do projeto para o futuro. Também se adotou o percentil de 50% para sintetizar os resultados dos GCMs e 25% da área analisada. O Tempo de Retorno a ser adotado foi obtido no eixo horizontal dos gráficos inferiores da Figura 2, interpretando a linha azul pontilhada a partir do Tempo de Retorno pretendido no projeto informado no eixo vertical.

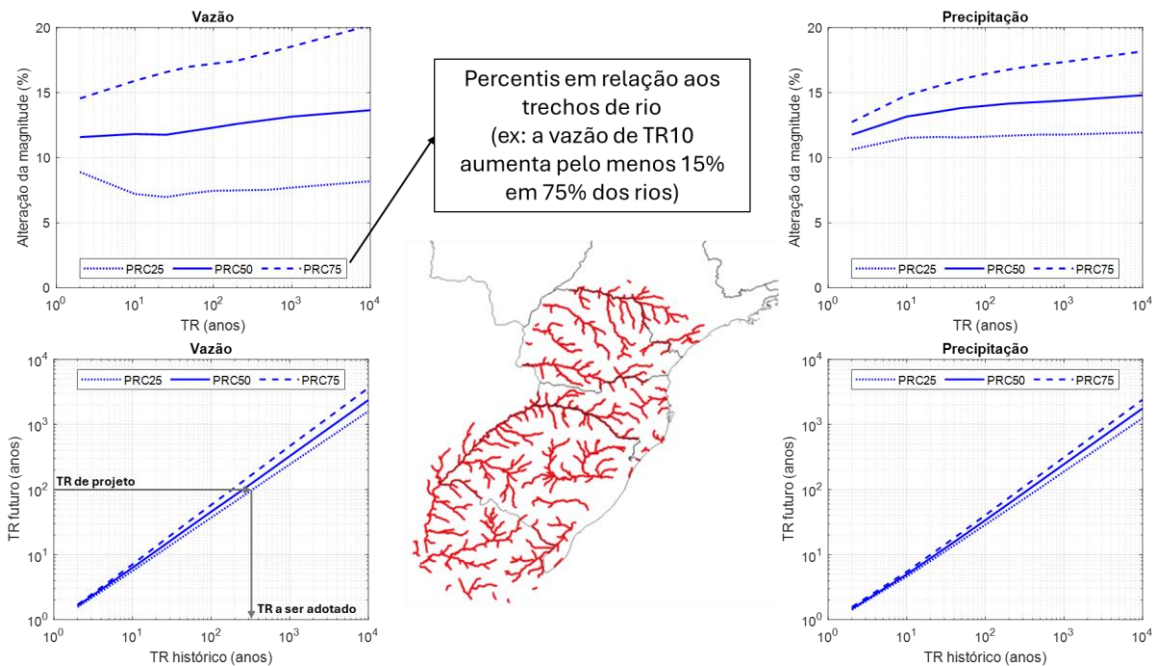


Figura 2. Projeções de impacto da mudança climática na precipitação máxima diária e vazão máxima na região Sul em termos de aumento da magnitude e diminuição do tempo de retorno (aumento da frequência)

Referências

- Brêda, J. P. L., de Paiva, R. C. D., Siqueira, V. A., & Collischonn, W. (2023). *Assessing climate change impact on flood discharge in South America and the influence of its main drivers*. *Journal of Hydrology*, 619, 129284.
- Chagas, V. B., Chaffe, P. L., & Blöschl, G. (2022). *Climate and land management accelerate the Brazilian water cycle*. *Nature Communications*, 13(1), 5136.
- Creager, W. P., Justin, J.D., And Hinds, J. (1945). *Engineering for dams*. Vol. 1. Wiley, New York, Chapman and Hall, London.
- Miranda, P. T., Petry, I., Alves, W. R. G., Matte, G., Paiva, R. C. D., Collischonn, W. (2023). *Cooperação em tecnologias para análises hidrológicas em escala nacional. CLIMA: Impactos de Mudanças Climáticas em Extremos de Vazão (Cheias e Estiagens) – Manual de Base de Dados*. IPH-ANA-HGE-CLIMA-A3. UFRGS: IPH, [Porto Alegre]. ANA, [Brasília].
- Moraes, S. R, Collischonn, W, Buffon, F. T., Eckhardt, R. R. (2024) *Revisão e consolidação da série histórica dos níveis das cheias do rio Taquari em Lajeado de 1939 a 2023*. Porto Alegre, 2024. Nota técnica. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/>. Acesso em: 19 mar. 2024.
- Paiva, R. C. D., Collischonn, W., Miranda, P. T., Fagundes, H.O., W., Kolling, A., Castro, L., Rossi, J., Matte, G., Laipelt, L., Alves. W, Petry. I. (2024a). *Cooperação em tecnologias para análises hidrológicas em escala nacional. CLIMA: Impactos de Mudanças Climáticas em Extremos de Vazão (Cheias e Estiagens) – Relatório Final*. IPH-ANA-HGE-CLIMA-A3. UFRGS: IPH, [Porto Alegre]. ANA, [Brasília].
- Paiva, R. C. D., Collischonn, W., Kolling, A., Miranda, P. T., (2024b). *Cooperação em tecnologias para análises hidrológicas em escala nacional. CLIMA: Sensibilidade de vazões a variabilidade e mudanças climáticas – Relatório Final*. IPH-ANA-HGE-CLIMA-A2. UFRGS: IPH, [Porto Alegre]. ANA, [Brasília].
- Petry, I., Paiva, R. C. D. D., Collischonn, W., Miranda, P. T., Rossi, J. B., Fagundes, H. D. O., ... & Araujo, A. A. (2023). *Change on flood discharge frequency in south america in the next decades: assessment of the CMIP6 climate projection*. Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos (25.: 2023: Aracaju). Anais [recurso eletrônico]. Porto Alegre: ABRHidro, 2023.