

# Métodos para estimativa de limiares de inundação em grandes bacias

Methods for flooding thresholds estimating in large basin

Lucas Verino Zanella Giacomelli<sup>1</sup> , Fernando Mainardi Fan<sup>1</sup> , Fernando Comerlato Scottá<sup>2</sup> 

<sup>1</sup>Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, Brasil. E-mails: giacomelli\_lucas@outlook.com, fernando.fan@ufrgs.br

<sup>2</sup>Departamento de Recursos Hídricos e Saneamento, Secretaria de Meio Ambiente e Infraestrutura do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, Brasil. E-mail: fernandoscotta.sema@gmail.com

**Como citar:** Giacomelli, L. V. Z., Fan, F. M., & Scottá, F. C. (2023). Métodos para estimativa de limiares de inundação em grandes bacias. *Revista de Gestão de Água da América Latina*, 20, e12. <https://doi.org/10.21168/rega.v20e12>

**RESUMO:** O presente trabalho buscou desenvolver e comparar métodos para estimativa de limiares de inundação para múltiplos trechos de rios em grandes bacias hidrográficas. Para isso, utilizou como estudo de caso diferentes rios localizados no estado do Rio Grande do Sul (RS) e Santa Catarina (SC). A metodologia proposta foi através da utilização de parâmetros estatísticos, estimando os tempos de retorno e as permanências de cotas de inundação já conhecidas em 23 estações. Com base nos resultados apresentados, os valores mais coerentes para a maioria dos casos foram através da utilização de um tempo de retorno (TR) de 1,5 anos. Contudo foram encontradas relativamente pequenas diferenças quando adotado 2 anos de tempo de retorno. O método estatístico da permanência com valor de 1,7% também apresentou resultados com desempenho similar. Portanto os valores estatísticos mencionados apresentam o menor erro provável para estimativa de limiares de inundação, podendo ser aplicados na grande maioria dos casos estudados. Na identificação de regularização de vazão, empiricamente verificou-se que poderiam ser adotados TRs aumentados para valores na ordem de 5 anos e permanências abaixo dos 0,5%. Cabe destacar a importância de uma prévia avaliação no comportamento hidrológico do rio em que o limiar ainda não foi estimado, antes que os métodos do TR ou permanência utilizados para estimativa do limiar de inundação desejado seja consolidado. Ressalta-se que as metodologias aplicadas e comparadas, principalmente considerando parâmetros estatísticos, buscaram representar de forma ampla e coerente as estimativas dos limiares de inundação, visando especialmente serem aplicadas em estações sem definição prévia e em modelos hidrológicos que simulem múltiplos trechos de rios em grandes bacias hidrográficas.

**Palavras-chave:** Limiares de Inundação; Sistemas de Alerta de Cheia; Previsão Hidrológica.

**ABSTRACT:** The present work aimed to develop and compare methods for estimating flood thresholds for multiple river stretches in large hydrographic basins. For this purpose, different rivers located in the state of Rio Grande do Sul (RS) and Santa Catarina (SC) were used as a case study. The proposed methodology drew on the use of statistical parameters, estimating the return period and permanence of flood levels already known in 23 gauges. Based on the results presented, the most consistent values for most cases were achieved with 1,5 years of return period, however small differences were found when adopting 2 years of return period. The statistical method of permanence with a value of 1,7% also presented results with similar performance. Therefore, the referred statistical values exhibit the smallest probable error for estimating flood thresholds, and can be applied in the vast majority of the cases studied. In identifying flow regularization, it was empirically verified that increased TRs could be adopted for values in the order of 5 years and permanences below 0,5%. It is worth to emphasize the importance of a previous assessment of the river hydrological behavior in which the threshold has not yet been estimated, before the return period or permanence methods used to estimate the desired flood threshold is consolidated. It is noteworthy that the applied methodologies and compared, mainly considering statistical parameters, sought to represent in a broad and coherent way the flood thresholds estimates, especially aiming to be applied in gauges without previous definition and hydrological models that simulate multiple stretches of rivers in large hydrographic basins.

**Keywords:** Flood Thresholds; Flood Warning Systems; Hydrological Forecasting.

## 1 INTRODUÇÃO

O aumento nos prejuízos ligados a eventos extremos, como tempestades severas e inundações tem despertado cada vez mais a preocupação por parte de diversos setores da sociedade e trazem a atenção para ações de redução dos impactos econômicos e sociais causados por estes eventos

Recebido: Agosto 25, 2022. Revisado: Abril 03, 2023. Aceito: Maio 22, 2023.



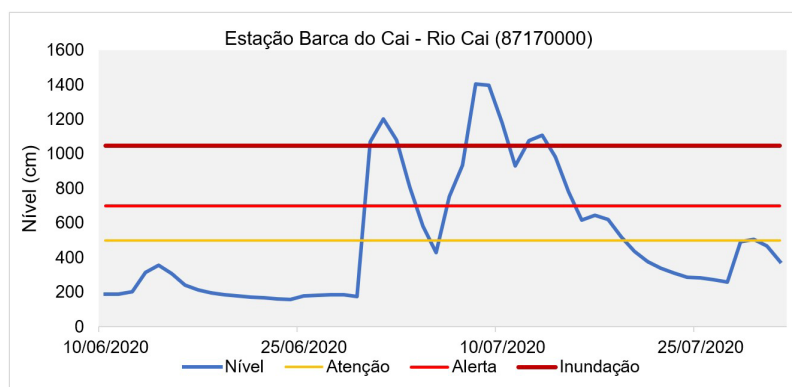
Este é um artigo publicado em acesso aberto (*Open Access*) sob a licença *Creative Commons Attribution*, que permite uso, distribuição e reprodução em qualquer meio, sem restrições desde que o trabalho original seja corretamente citado.

(Fan et al., 2016a). No ano de 2019, as inundações representaram cerca de 49% das ocorrências de eventos extremos registradas no mundo, atingindo 45% do total de número de óbitos ligados a desastres naturais neste mesmo ano (Emergency Events Database, 2022).

Nas últimas décadas, em função do aumento populacional e consequentemente surgimento de ocupações próximas às várzeas de inundação, o número de pessoas afetadas e os prejuízos econômicos decorrentes de inundações têm aumentado de forma significativa (Goerl et al., 2017). A combinação entre crescimento populacional e falta de investimentos em planejamento e infraestrutura para amenizar os efeitos das inundações, deixam a população em áreas vulneráveis aos efeitos destes eventos extremos (Defesa Civil do Estado de Santa Catarina, 2022).

Neste contexto, para amenizar os efeitos das cheias e inundações, surgem as medidas chamadas não estruturais, dentre elas destaca-se o mapeamento de áreas de risco, simulações e previsões hidrológicas, além dos Sistemas de Alerta de Cheia (SAC). Os SAC têm como principal objetivo prever a possibilidade futura de ocorrência de inundações em trechos de rios vulneráveis a estes eventos com precisão e antecedência para que sejam emitidos avisos à Defesa Civil, consumidores de água e população local na região possivelmente afetada (Fan et al., 2016b; Alfieri et al., 2012; Moore et al., 2005).

De acordo com Krzystofowicz & Davis (1983), os SAC são compostos pelo monitoramento, o qual é realizado principalmente através de estações hidrometeorológicas, pela previsão através de modelos e por meio de profissionais especializados. Outro fator chave para composição dos SAC são as cotas de referência, também conhecidas como limiares, os quais caracterizam a situação hidrológica em relação ao evento de cheia em questão, bem como os valores em que este rio irá sair da calha (inundação), conforme exemplificado na Figura 1. O principal deles é o limiar de inundação, o qual representa o valor aproximado de vazão ou de nível em que determinado rio extrapola seu leito maior em determinado ponto.



**Figura 1** – Limiares de cheia e inundação utilizados para a estação Barca do Cai (SACE/CPRM-RS)

A determinação de limiares, sobretudo o de inundação, possibilita a identificação de eventos de cheia, podendo compor hidrogramas gerados a partir de dados de estações fluviométricas, ou de previsão hidrológica a partir de modelos. Cabe destacar que os limiares, além de facilitar na interpretação de dados de monitoramento e previsão, auxiliam no mapeamento de áreas vulneráveis a estes eventos, além de subsidiarem a emissão de alertas com base na possibilidade de superação destes limiares.

O Programa de Consolidação do Pacto Nacional pela Gestão das Águas (Progestão) da Agência Nacional de Águas e Saneamento (ANA), regulamentado pela Resolução ANA nº 379/2013, estabelece cinco metas com base em normativos legais ou de compartilhamento de informações relacionados à gestão de recursos hídricos. Destaque para a meta I.4 a qual refere-se à prevenção de eventos hidrológicos críticos, através da operação dos sistemas de prevenção a eventos hidrológicos, onde os limiares de inundação são um pilar fundamental.

Em cenário nacional, os limiares de inundação atualmente são estimados principalmente pelo Serviço Geológico do Brasil (SGB - CPRM), através de levantamentos em campo, questionários, registros de marcas de cheias, relatórios fotográficos, além de levantamentos topográficos de campo, conforme descrito por Germano & Matos (2017). No continente Europeu e nos Estados Unidos, estes valores também são dependentes de informações de campo, além de banco de dados e medições de descarga em pequenas bacias (Gourley et al., 2012), além de simulações baseadas no desenvolvimento de modelos (Lombardi et al., 2021; Norbiato et al., 2009). Apesar de apresentarem eficiência, os métodos atualmente utilizados podem representar altos custos de implantação e são limitados à ocorrência destes eventos, representando dificuldades de estimativa padronizada e aplicação.

Por outro lado, métodos estatísticos para definição de limiares de inundação também são utilizados, conforme apresentado por Alfieri et al. (2014) e Zsoter et al. (2020), representando maior facilidade de execução, rapidez, além de possuírem eficiência e custos menos expressivos quando comparados aos demais métodos. Contudo, apesar das vantagens destacadas, não existem na literatura científica estudos comparativos em relação aos métodos, sobretudo com o interesse de aplicação para geração de informação em larga escala, para várias localidades.

Neste contexto, o presente estudo se propôs preencher uma lacuna dentro da pesquisa e da prática de engenharia de recursos hídricos, que é a falta de investigação sobre a melhor técnica para a definição simplificada de limiares de inundação para múltiplos trechos de rios em larga escala, servindo para a aplicação em modelos de previsão de inundação e para satisfazer necessidades do Progestão/ANA. Neste contexto, o objetivo foi comparar distintas abordagens para definição de limiares de inundação utilizando uma base de dados do Serviço Geológico do Brasil (SGB-CPRM) e Sala de Situação SEMA RS, tendo como estudo o estado do Rio Grande do Sul e parte de Santa Catarina.

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

O estudo apresentado a seguir usou métodos desenvolvidos para estimativa em larga escala de limiares de inundação para múltiplos trechos de rios em grandes bacias hidrográficas, tendo como estudo de caso o estado do Rio Grande do Sul (RS) e algumas bacias de Santa Catarina (SC). A Figura 2 apresenta um fluxograma da metodologia que foi seguida, a qual é detalhada nos itens a seguir,



Figura 2 - Fluxograma da metodologia aplicada.

### 2.1 Dados Utilizados

Dentro da hidrografia do Rio Grande do Sul e da bacia do Rio Uruguai em território catarinense, foram analisadas estações fluviométricas que possuem disponibilidade de dados convencionais (Figura 3), além de dados telemétricos, localizadas em rios com Alta e Média Vulnerabilidade, conforme o Atlas de Vulnerabilidade a Inundações apresentado pela Agência Nacional de Águas (2014). Além disso, adotou-se a recomendação de Tucci (2012), que destaca que o período de dados ideal é na ordem de 30 a 50 anos,

Portanto, neste contexto, as estações escolhidas neste estudo são do tipo convencional, em locais onde também há medições telemétricas para que se tenham valores históricos com uma boa disponibilidade temporal de dados, além de dados telemétricos, necessários para monitoramento de cheia em tempo real. As séries de dados utilizadas são, em sua maioria, superiores a 30 anos e possuem dados das médias diárias de nível, além das máximas mensais e anuais, exceto a estação Caís Mauá C6 a qual tem dados desde 2014 (~7 anos).

Embora existam dados disponíveis tanto de nível como de vazão, optou-se por utilizar dados de nível em função de alguns pontos de interesse serem também áreas de várzea, cujos resultados de vazões disponíveis não possuem bons ajustes de curva chave. Portanto em casos que as cheias superam as cotas de inundação, os valores de vazão são imprecisos e podem comprometer os resultados justamente no tipo de dado que se tem interesse: as inundações.

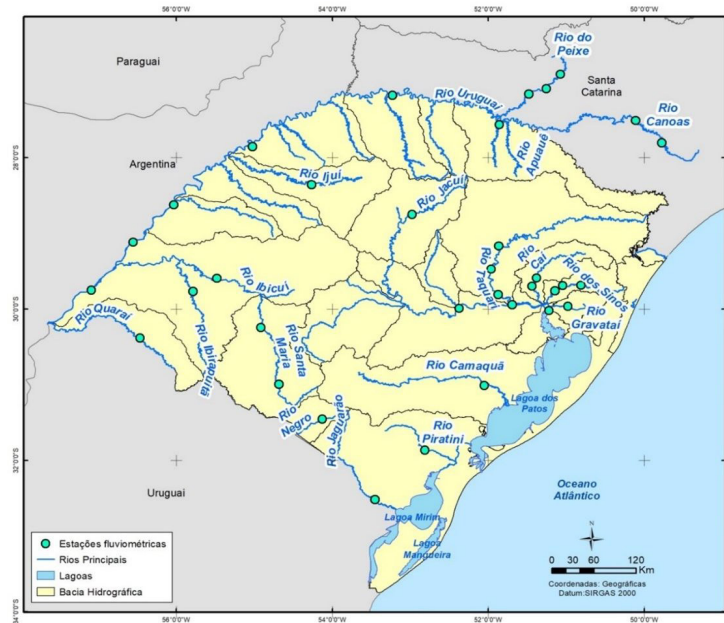


Figura 3 - Locais analisados.

## 2.2 Estimativa de Parâmetros Estatísticos

Inicialmente foram calculados os Tempos de Retorno e as Curvas de Permanência referentes aos níveis medidos em 23 estações selecionadas, considerando as séries históricas de cada estação, disponíveis através do site Hidroweb da Agência Nacional de Águas.

### 2.2.1 Níveis de Inundação Utilizando Tempos de Retorno

De acordo com Villela & Mattos (1975) o período de retorno de uma enchente é o tempo médio em anos que esta enchente é igualada ou superada pelo menos uma vez. Este critério é habitualmente utilizado para dimensionamento de obras hidráulicas de qualquer natureza, desde o dimensionamento de grandes barragens até pequenas obras de drenagem urbana.

Inicialmente foram calculadas as probabilidades empíricas, considerando os máximos anuais dentro da série histórica, considerando a equação de Gringorten, conforme segue:

$$P = \frac{m-0,44}{N+0,12} \quad (1)$$

Onde:

P - Posição de plotagem ou probabilidade empírica

N - Tamanho da amostra (número de anos); e

m - ordem (m maior = 1; m menor =N),

Posteriormente o Tempo de Retorno foi calculado através do inverso da probabilidade (P):

$$TR = \frac{1}{P} \quad (2)$$

Onde: TR é o tempo de retorno em anos em anos, enquanto P é a probabilidade de ocorrer um evento igual ou superior em um ano qualquer.

Foram calculados e analisados os tempos de retorno a partir das cotas máximas anuais de cada uma das 23 estações.

### 2.2.2 Níveis de Inundação Utilizando Curvas de Permanência

Conforme destacado por Tucci (2012), inicialmente as séries de dados de cada uma das estações devem ser ordenadas em ordem decrescente, sendo atribuída a ordem a cada um dos casos sendo 1 o menor e n+1 para os consequentes. Por fim será computada a frequência em que cada valor ordenado é excedido ou igualado, conforme a equação:

$$F = 100 * \left(\frac{m}{N}\right) \quad (3)$$

Onde

N é o tamanho da amostra (número de anos) e

m é a ordem (m maior = 1; m menor =N),

Para as 23 estações que possuem limiares de inundação pré-definidos, foram calculados os TR e as permanências referentes aos níveis de inundação em cada um destes pontos para serem utilizados neste estudo, conforme descrito nos itens a seguir.

### 2.3 Validação Cruzada Entre Limiares Existentes

Após estimar os parâmetros estatísticos de todas as 23 estações consideradas (ilustradas na Figura 3), foram analisados os tempos de retorno e as permanências referentes às cotas de inundação nestes locais, ilustrados na Tabela 1. As estações destacadas já possuem estes limiares definidos conforme dados do SACE/CPRM e Sala de Situação SEMA RS, através de informações e levantamentos de campo.

Os valores de tempo de retorno e permanência das cotas de inundação selecionados entre as estações monitoradas foram utilizados para estimar novos limiares nestes pontos. Posteriormente foram comparados aos limiares atuais, observando as diferenças entre a cota atualmente utilizada e a estimada, fazendo uma validação cruzada dos dados.

**Tabela 1** - Estações telemétricas com limiares pré-definidos.

Estação	Código	Operadora	Rio	Inundação	
				Cota (cm)	Fonte
Manoel Viana	76560000	CPRM	Ibicuí	1050	SACE/CPRM
Alegrete	76750000	CPRM	Ibirapuitã	970	SACE/CPRM
Quaraí	77500000	CPRM	Quaraí	900	SACE/CPRM
Rosário do Sul	76310000	CPRM	Santa Maria	600	Sala de Situação SEMA RS
Passo do Mendonça	87905000	CPRM	Camaquã	500	Sala de Situação SEMA RS
Iraí	74100000	CPRM	Uruguai	800	SACE/CPRM
Itapiranga	76240000	CPRM		730	SACE/CPRM
Porto Lucena	74800000	CPRM		1000	SACE/CPRM
Passo São Borja	75780000	CPRM		1000	SACE/CPRM
Itaqui	75900000	CPRM		830	SACE/CPRM
Uruguaiana	77150000	CPRM		850	SACE/CPRM
Barca do Caí	87170000	CPRM	Caí	1000	SACE/CPRM
Passo Montenegro	87270000	CPRM		600	SACE/CPRM
Muçum	86510000	CPRM	Taquari	1600	SACE/CPRM
Taquari	86950000	CPRM		850	SACE/CPRM
Rio Pardo	85900000	CPRM	Jacuí	850	Sala de Situação SEMA RS
Triunfo	87010000	SEMA		500	Sala de Situação SEMA RS
Cais Mauá C6	87450004	SEMA	Guaíba	210	Sala de Situação SEMA RS
Vila Canoas	7120000	CPRM	Rio Canoas	700	SACE/CPRM
Encruzilhada II	7135000	CPRM		600	SACE/CPRM
Rio das Antas	7271500	CPRM	Rio do Peixe	450	SACE/CPRM
Tangará	7281000	CPRM		550	SACE/CPRM
Joaçaba I	7284900	CPRM		900	SACE/CPRM

Fonte: SEMA-RS, 2023; CPRM, 2023.

Visando gerar resultados mais robustos, foi aplicado o método de validação cruzada denominado "Leave-One-Out". O método trata-se de uma ferramenta de amostragem para treino e reajuste em subamostras, obtendo informações adicionais sobre o ajuste de modelos. A validação em questão, separa os dados em duas partes, utilizando uma observação na fase de validação e treina-se o modelo com n-1 dados, avaliando as observações restantes e repetindo esse procedimento n vezes, excluindo em cada momento uma observação diferente em relação as amostras anteriores (Universidade Federal do Paraná, 2023).

Para execução deste método, a mediana dos tempos de retorno e das permanências estimadas para as cotas de inundação das 23 estações foram separadas em partes utilizando somente uma observação na fase de validação com n-1 dados, utilizando o restante dos dados para avaliação, conforme ilustrado na Figura 4. O processo foi repetido 22 vezes, excluindo uma estação para cada observação diferente e posteriormente a considerando para validação da estação a seguir.

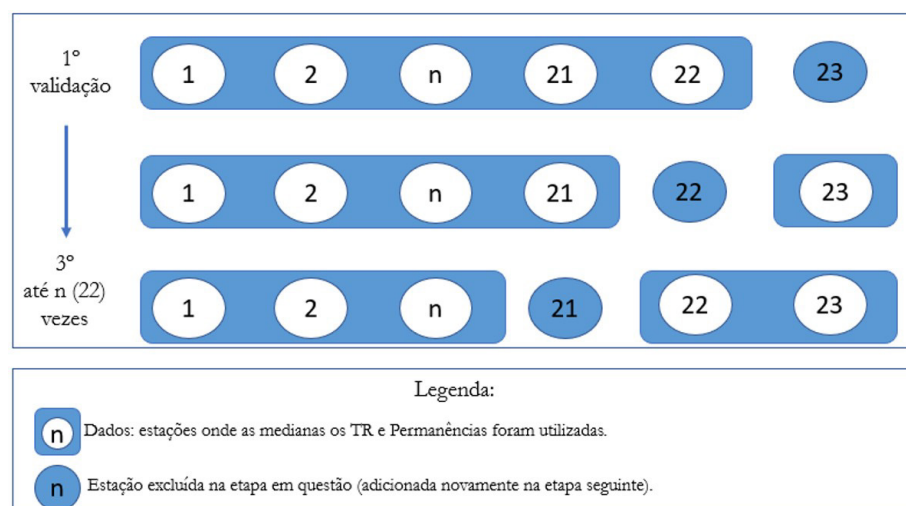


Figura 4 – Validação Leave-One-Out utilizada (Autor).

Para todas as estações foi tomado cuidado para identificar possíveis anomalias em relação às médias dos valores das demais estações, sendo pontualmente analisados estes casos para verificar possíveis divergências em relação aos demais pontos, os quais podem ser ocasionados por características fisiográficas, uso e ocupação do solo, construções de diques, barragens e bacias de contenção.

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 3.1 Estimativa de Parâmetros Estatísticos

Para as 23 estações com limiares pré-definidos pela CPRM e Sala de Situação são ilustradas a permanência da cota de inundação de cada estação, bem como o Tempo de Retorno (TR) desta cota de referência, conforme ilustrado na Tabela 2.

Tabela 2 – Permanências e TR das cotas de inundação nas 23 localidades.

Estação	Código	Área de Drenagem (Km <sup>2</sup> )	Rio	Inundação		
				Cota (cm)	Permanência (%)	TR (Anos)
Manoel Viana	76560000	29400	Ibicuí	1050	0,54	4,4
Alegrete	76750000	5867	Ibirapuitã	970	3,41	1,3
Quaraí	77500000	4570	Quaraí	900	1,00	1,6
Rosário do Sul	76310000	12100	Santa Maria	600	1,72	1,4
Passo do Mendonça	87905000	15600	Camaquã	500	4,37	1,1
Iraí	74100000	61900	Uruguai	800	0,61	1,9
Itapiranga	74329000	72300		730	0,87	1,5
Porto Lucena	74800000	95200		1000	0,13	5,6
Passo São Borja	75780000	125000		1000	2,33	1,5
Itaqui	75900000	131000		830	4,11	1,5
Uruguiana	77150000	190000		850	4,20	1,4
Barca do Caí	87170000	3030	Caí	1000	1,16	1,2
Passo Montenegro	87270000	4360		600	1,92	1,1
Muçum	86510000	16000	Taquari	1600	0,07	4,1
Taquari	86950000	25900		850	0,52	2,1
Rio Pardo	85900000	38700	Jacuí	850	11,85	1,1
Triunfo	87010000	68600		500	2,00	1,7
Cais Mauá C6	87450004	82400	Guaíba	210	4,40	1,2
Vila Canoas	71200000	1010	Rio Canoas	700	1,76	1,4
Encruzilhada II	71350001	3230		600	3,76%	1,6
Rio das Antas	72715000	801	Rio do Peixe	450	0,00%	22,0
Tangará	72810000	2010		550	0,00%	22,0
Joaçaba I	72849000	3710		900	0,03%	7,0



Com relação às 23 estações com cotas de inundação pré-definidas, observou-se que as permanências destes valores possuem variabilidade entre os valores calculados. A Figura 5 apresenta o boxplot com valores estatísticos das permanências calculadas de cada cota de inundação, onde pode-se observar um valor máximo de 11,9%, mínimo de 0,004%, já o primeiro e terceiro quartil foram respectivamente de 0,5 e 3,8%, enquanto a mediana foi de 1,7%.

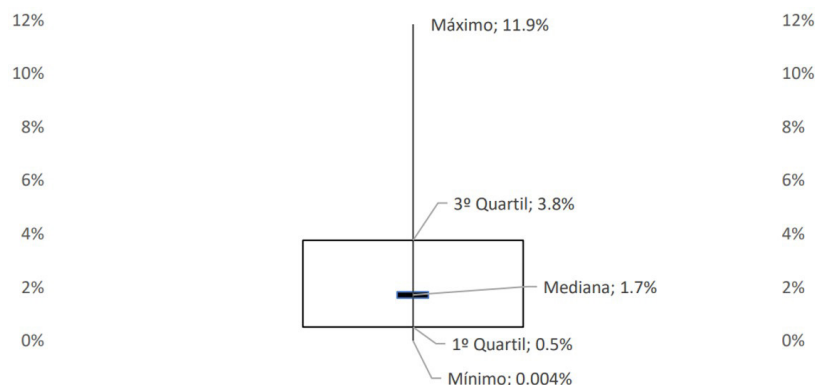


Figura 5 - Boxplot das permanências referentes às cotas de inundação,

Dentre as 23 estações amostradas, 9 (39%) delas possuem o limiar de inundação com uma permanência abaixo de 1%, com um limiar de inundação com permanência entre 1 e 2% são 6 (26%) estações, acima de 2% e abaixo de 5% são 7 estações (30,4%) e com permanência maior do que 5% somente 1 estação (4%).

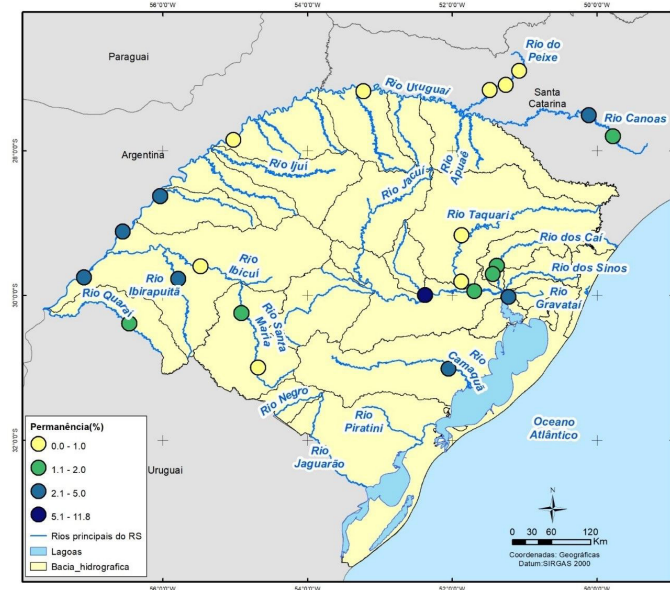
Destaca-se que os locais onde as cotas de inundação com valores de permanências elevadas foram observadas, são em maioria rios de grande porte, ou seja, de maior ordem hidrológica entre os rios amostrados, além de estarem localizados em áreas com pouca declividade, resultando em eventos de cheia e inundação com mais tempo de duração. Alguns exemplos: rio Jacuí na estação rio Pardo (permanência de 11,8%), rio Uruguai nas estações Uruguiana (permanência de 4,2%) e Itaqui (permanência de 4,1%), Guaíba na estação Cais Mauá (permanência de 4,4%), rio Camaquã na estação Passo do Mendonça (permanência de 4,4%). Contudo, ressalta-se que estes mesmos rios em locais com baixa recorrência de eventos inundações tendem a ter cotas de inundação com permanências significativamente menores, fato que ocorre em função de características do trecho ou localidade que podem facilitar o escoamento, principalmente relacionadas a declividade do trecho.

Por outro lado, cotas de inundação com permanências menores podem ser observados, além de trechos com baixa recorrência de inundações, em rios de menor ordem hidrológica, principalmente nos locais com maior declividade, onde os picos de cheia ocorrem de forma mais rápida. Alguns exemplos podem ser observados nos seguintes rios e estações: rio do Peixe nas estações rio das Antas, Tangará e Joaçaba, rio Taquari nas estações Muçum e Taquari, rio Uruguai nas estações Iraí, Itapiranga e Porto Lucena, além do rio Ibicuí na estação Manoel Viana. A Figura 6 apresenta a distribuição das 23 estações utilizadas, com as suas respectivas permanências calculadas referentes às cotas de inundação em cada localidade.

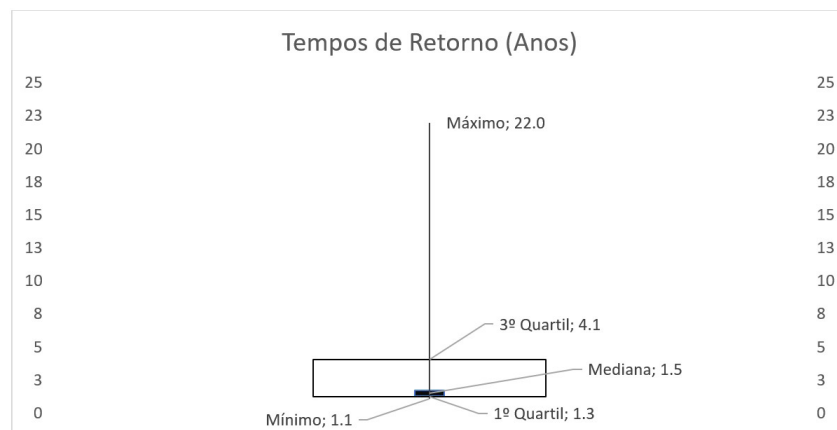
Nos exemplos citados e ilustrados anteriormente destacam-se que nos casos dos Rios do Peixe, Taquari e Uruguai (Iraí e Itapiranga), há geração de energia através de usinas em pontos a montante das estações consideradas. Alguns casos com regularização de vazões podem gerar diminuição de eventos de cheia, conseqüentemente diminuindo as permanências das cotas de inundação. Além disso, são locais menos habitados e com características fisiográficas que facilitam o escoamento, tais como declividade e rugosidade do trecho.

Para os Rios Ibicuí na estação Manoel Viana e Uruguai em Porto Lucena, as permanências também são baixas, mesmo sendo rios maiores e pouco influenciados por regularização das vazões. Isso ocorre porque ambos os locais têm características que permitem uma maior facilidade de escoamento, diminuindo o tempo de duração das cheias nestes locais, bem como a frequência de eventos de inundação, além de serem localidades pouco habitadas. Este último fato pode ser reforçado pelos tempos de retorno calculados para estes pontos: 4,4 anos para Manoel Viana e 5,6 anos para Porto Lucena.

Com relação aos Tempos de Retorno calculados, pode-se observar uma menor variabilidade entre os resultados em relação ao método anterior. Conforme ilustrado na Figura 7 o valor máximo foi de 22 anos, enquanto o mínimo, primeiro quartil e mediana foram respectivamente de 1,1 anos, 1,3 e 1,5 anos e o terceiro quartil de 4,1 anos.



**Figura 6** – Distribuição das 23 estações com permanências calculadas em relação as cotas de inundação.



**Figura 7** - Boxplot dos Tempos de Retorno (anos).

Para as cotas de inundação das 23 estações, observa-se uma predominância de 69% (16 estações) com TR entre 1 e 2 anos. Entre 2 e 5 anos, são 3 estações (13%), e por fim 2 estações (9%) com TR entre 5 e 10 anos e mais 2 (9%) com TR acima de 10 anos.

Destaca-se que os maiores tempos de retorno calculados foram obtidos para o Rio do Peixe nas estações Rio das Antas e Tangará (22 anos) e para estação Joaçaba (7 anos), além do Rio Uruguai na estação Porto Lucena (5,6 anos), Rio Ibicuí na estação Manoel Viana (4,4 anos) e Rio Taquari na estação Muçum (4,1 anos). Destaca-se que estes valores mais elevados, representam uma menor recorrência de eventos de inundação nestas regiões, em função de características fisiográficas destes locais, bem como o uso e ocupação do solo.

No caso de Rio do Peixe, além dos pontos estarem a jusante de locais com operação de usinas, as estações consideradas estão em um local do leito onde o perfil transversal é “encaixado”, ou seja, com margens mais íngremes, o que resulta em boa parte dos eventos de cheia sem extrapolar as margens (sem inundação). Nas localidades de Porto Lucena e Manoel Viana, os tempos de retorno são maiores em relação a mediana (1,5 anos) devido a uma maior facilidade de escoamento em ambas as regiões, facilitando a passagem de água e evitando que ocorram inundações em eventos de menor severidade.

Na localidade de Muçum, o Rio Taquari conta com influência da operação de usinas hidrelétricas localizadas a montante, mantendo os níveis e vazões estáveis ou com picos de cheia na localidade de Muçum em eventos de menor proporção. Além disso, o Rio das Antas, e os Rios Guaporé e Carreiro (afuentes ao Rio Taquari), todos com topografia sinuosa em suas áreas de contribuição, o que



contribui para ocorrência de cheias com rápida elevação dos níveis e vazões, principalmente na localidade de Muçum.

Para as demais localidades, os tempos de retorno dos eventos de inundação apresentaram variações entre 1,1 e 2,1 anos e um valor mediano de 1,5 anos. Estes valores confirmam os frequentes eventos de cheia com registros de inundação que ocorrem em cada um destes pontos ao longo dos anos. A Figura 8 apresenta a distribuição das 23 estações utilizadas com os respectivos tempos de retorno referentes às cotas de inundação em cada localidade.

Destaca-se que salvo o caso do Rio Uruguai nas localidades de Itapiranga e de Iraí, os demais rios não possuem efeitos significativos de regularização de vazões em trechos a montante, ou seja, ainda possuem vazões naturalizadas, representando um comportamento hidrológico natural, Leopold & Maddock (1953), menciona em seus estudos referentes à hidráulica de canais, um tempo de retorno de aproximadamente 2 anos para ocorrência de inundações em rios com vazões naturalizadas.

Em um estudo de caso na bacia do Rio Doce, Castilho et al. (1999) mencionam períodos de retorno para as cotas de inundação entre 1 e 2 anos para a maioria das estações analisadas na bacia em questão, ou seja, 4 entre 6 estações: Ponte Nova, Nova Era, Mário de Carvalho e Governador Valadares. Os outros dois pontos, Tumiritinga e Colatina tiveram cotas de inundação com tempos de retorno na ordem de 2 a 4 anos.

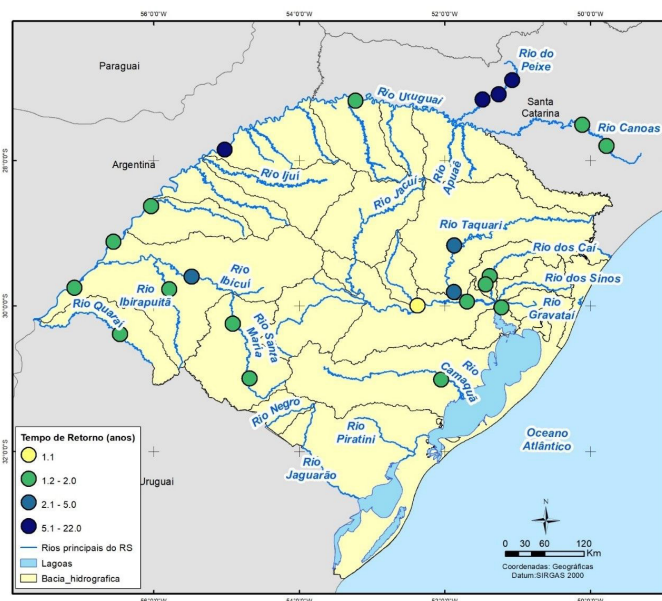


Figura 8 - Distribuição das 23 estações com os TR calculados em relação as cotas de inundação.

Outro fator que corrobora com os resultados encontrados é a predominância destas estações em locais cujo objetivo é o monitoramento de eventos de cheias e inundações para ações de Defesa Civil na mitigação do impacto das cheias nas populações próximas. Portanto, é esperado maior ocorrência de eventos de cheia com inundações e menor tempo de retorno nesses locais.

### 3.2 Validação Cruzada

O processo de validação cruzada considerou as medianas dos valores calculados para as permanências e para os tempos de retorno de todas as 23 estações. O processo de validação foi repetido para cada uma das 23 estações, excluindo uma estação por validação e recolocando-a na validação seguinte. Destaca-se que as medianas das permanências utilizadas durante este processo variaram entre 1,4% e 1,7% e os tempos de retorno entre 1,5 e 1,6 anos, conforme a estação validada e a sequência dos locais utilizados.

A Tabela 3 apresenta os resultados das cotas de inundação estimadas para cada estação através das permanências (%) e dos Tempos de Retorno (anos). Posteriormente é apresentada a diferença entre os valores das cotas de inundação estimadas pelo método de validação cruzada e as atualmente utilizadas em cada estação.

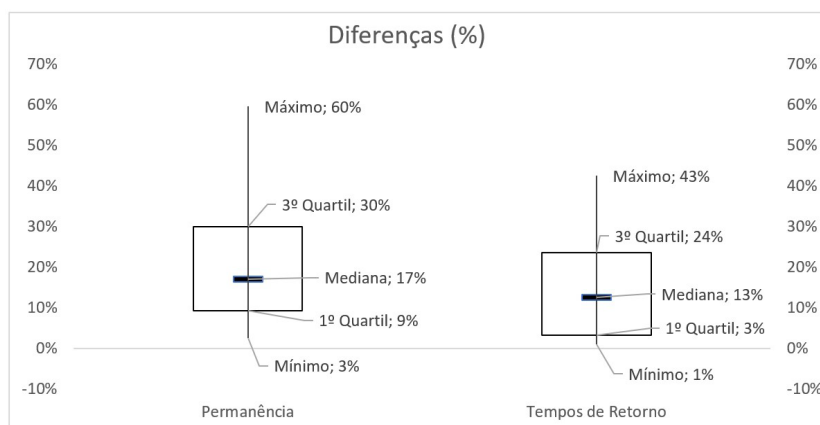
**Tabela 3** – Cotas de inundação estimadas e diferença em relação as cotas atuais.

Estação		Cota de Inundação Atual (m)	Inundação Estimada (m)		Diferença (%)	
Nome	Código		Permanência (%)	TR (anos)	Permanência	TR
Manoel Viana	76560000	1050	917	837	-13%	-20%
Alegrete	76750000	970	1135	1050	17%	8%
Quaraí	77500000	900	798	887	-11%	-1%
Rosário do Sul	76310000	600	618	611	3%	2%
Passo do Mendonça	87905000	500	606	618	21%	24%
Iraí	74100000	800	638	700	-20%	-13%
Itapiranga	76240000	730	618	649	-15%	-11%
Porto Lucena	74800000	1000	572	612	-43%	-39%
Passo São Borja	75780000	1000	1080	1010	8%	1%
Itaqui	75900000	830	983	854	18%	3%
Uruguaiana	77150000	850	994	875	17%	3%
Barca do Caí	87170000	1000	908	1105	-9%	11%
Passo Montenegro	87270000	600	615	696	3%	16%
Muçum	86510000	1600	764	1104	-52%	-31%
Taquari	86950000	850	705	770	-17%	-9%
Rio Pardo	85900000	850	1105	994	30%	17%
Triunfo	87010000	500	521	406	4%	-19%
Cais Mauá C6	87450004	210	190	239	-10%	14%
Vila Canoas	71200000	700	726	743	4%	6%
Encruzilhada II	71350000	600	725	581	21%	-3%
Rio das Antas	72715000	450	220	275	-51%	-39%
Tangará	72810000	550	222	316	-60%	-43%
Joaçaba I	72849000	900	416	575	-54%	-36%
<b>Média das Diferenças</b>					<b>-9%</b>	<b>-7%</b>
<b>Mediana das Diferenças</b>					<b>-9%</b>	<b>-1%</b>
<b>Desvio Padrão das Amostras</b>					<b>0,26</b>	<b>0,20</b>

Para cada uma das estações foram calculadas as diferenças entre os valores das cotas de inundação atualmente utilizadas e os valores estimados. Com base nos valores estimados utilizando as permanências, pode-se observar uma diferença mínima de 3%, uma mediana de 17%, enquanto o primeiro e terceiro quartil foram respectivamente de 9% e 30%. A maior diferença encontrada foi de 60%, obtida para a estação Tangará, seguido dos erros de 54% e 51% obtidas nas estações Joaçaba e Rio das Antas.

Para as cotas estimadas utilizando os tempos de retorno, observa-se diferenças ainda menores quando em comparação ao método utilizando permanências. A diferença mínima obtida foi de apenas 1%, enquanto o primeiro quartil e a mediana foram de 3% e 13%, respectivamente. O terceiro quartil também apresentou diferenças menores em comparação ao método anterior, ou seja, 24%, assim como a diferença máxima: 43%.

A Figura 9 apresenta o boxplot contendo os valores estatísticos das diferenças percentuais obtidas utilizando a validação cruzada com as medianas.



**Figura 9** – Boxplot com as diferenças calculadas.

Cabe destacar que as maiores diferenças para ambos os métodos foram observadas em quatro estações: Rio das Antas, Tangará, Joaçaba I e Muçum, onde as diferenças entre o atual e estimado atingiram valores próximos ou acima de 50%. Em todos estes casos, os valores das cotas estimadas foram subestimados, ou seja, ficaram com valores abaixo das cotas atuais. Nas quatro estações, observa-se que a montante destes locais há atividades de hidrelétricas, as quais possuem influência no comportamento hidrológico destes rios, além das características fisiográficas as quais representam vales encaixados nestas localidades. O mesmo também ocorre, porém com uma menor influência, nas estações Porto Lucena e Iraí, ambas no rio Uruguai,

Em alguns casos de rios com regularização de vazões, como é o caso de bacias com hidrelétricas as quais possuem reservatórios, algumas cheias de menores proporções são amortecidas pelos reservatórios e conseqüentemente as vazões não são vertidas pelas turbinas/ou vertedores. A amostragem adotada no presente trabalho para estes casos é pequena, mas nesses casos as cotas de inundação apresentam permanências menores do que em comparação a rios sem barramento (geralmente <0,5%) e tempos de retorno mais altos, ou seja, superiores a 5 e 10 anos,

Nos rios em geral observa-se cotas de inundação com tempos de retorno entre 1 e 2 anos, conforme descrito em estudos realizados por Germano & Matos (2017) para a bacia do Rio Caí, bem como por Castilho et al. (1999) na bacia do Rio Doce. Ainda no âmbito brasileiro, o Centro Nacional de Monitoramento e Alerta de Desastres Naturais – CEMADEN considera 1,5 anos de tempo de retorno para indicar possíveis inundações e um TR de 10 anos para indicar cheias extremas, o que reafirma a utilização dos valores encontrados no processo de validação cruzada para indicar cotas de inundação.

### 3.3 Comparação das Formas de Estimativa da Cota de Inundação

Conforme estimado e apresentado no método de validação cruzada, os valores de permanência e tempo de retorno ideais para estimativa de limiares de inundação são de aproximadamente 1,7% e 1,5 anos, respectivamente considerando a maioria dos casos.

Neste contexto, visando avaliar os acertos e diferenças para cada situação frente a diferentes valores de permanência e tempos de retorno, foram analisadas as cotas estimadas para as 23 estações, considerando as permanências de 0,5%, 1%, 1,7% e 2% e as respectivas diferenças (%) entre as estimativas e a cota de inundação atual. Além das estimativas considerando tempos de retorno de 1,5, 2 e 5 anos e as respectivas diferenças em relação as cotas atualmente utilizadas em cada localidade.

Com base nos valores apresentados, observa-se em relação a amostragem total dos 23 pontos, as menores diferenças médias e medianas para o método que considera uma permanência de 1% (respectivamente -1% e 8%). Também para a amostragem total, as menores diferenças médias e medianas foram para os tempos de retorno de 1,5 e 2 anos, com valores na ordem de respectivamente -8% e -1% para o TR de 1,5 anos e de 3% e 8% para o TR de 2 anos.

A Tabela 4 apresenta, dentre a amostragem total, o número de locais e a porcentagem em relação ao total dos locais (23 estações), as diferenças de até 10%, até 15% e até 20%. Para o caso de diferenças menores do que 10%, destaca-se o TR de 1,5 anos com 8 locais (35%), além a permanência de 1% e o TR de 2 anos, ambos com 7 locais (30%).

Considerando diferenças de até 20%, o valor de permanência que mais locais se destacou foi o de 1,7%, com um total de 16 pontos, representando 70% do total. O mesmo ocorreu com o TR de 1,5 anos, também com 16 estações. Destaca-se também o TR de 2 anos e a permanência de 2%, respectivamente com 15 e 14 estações (65% e 61%).

**Tabela 4** – Diferença entre os métodos, considerando todas as localidades.

Diferença	Todos os Locais (23 estações)													
	Permanências						Tempos de Retorno (Anos)							
	0,5%	1%	1,7%	2%	1,5	2	5							
Até 10%	4	17%	7	30%	6	26%	5	22%	8	35%	7	30%	3	13%
Até 15%	7	30%	11	48%	11	48%	10	43%	14	61%	12	52%	4	17%
Até 20%	8	35%	11	48%	16	70%	14	61%	16	70%	15	65%	5	22%

Conforme comentado anteriormente, locais onde há operação de usinas a montante, apresentam TR maiores e permanências menores. Portanto, considerou-se as diferenças excluindo os locais influenciados pela operação de reservatórios: Rio das Antas, Tangará, Joaçaba I e Muçum, restando 19 estações. Considerando tal exclusão, observa-se uma melhora dos percentuais do número de locais

com as referidas diferenças, conforme ilustrado na Tabela 5. Para o caso de até 10% destaca-se o TR de 1,5 anos, o qual contempla 42% das localidades, seguido do TR de 2 anos e permanência de 1%, contemplando 37% dos locais analisados.

Para diferenças de até 20%, a permanência de 1,7% e o TR de 1,5 anos se destacaram, contemplando 84% das localidades. Para esta mesma diferença, o TR de 2 anos e a permanência de 2% contemplaram 74% das estações.

**Tabela 5** - Diferença entre os métodos, excluindo locais com influência de operação de usinas.

Diferença	Somente em locais sem influência de Regularização de Vazões (19 estações)													
	Permanências								Tempos de Retorno (Anos)					
	0,5%		1%		1,7%		2%		1,5		2		5	
Até 10%	4	21%	7	37%	6	32%	5	26%	8	42%	7	37%	1	5%
Até 15%	7	37%	11	58%	11	58%	10	53%	14	74%	12	63%	1	5%
Até 20%	8	42%	11	58%	16	84%	14	74%	16	84%	14	74%	2	11%

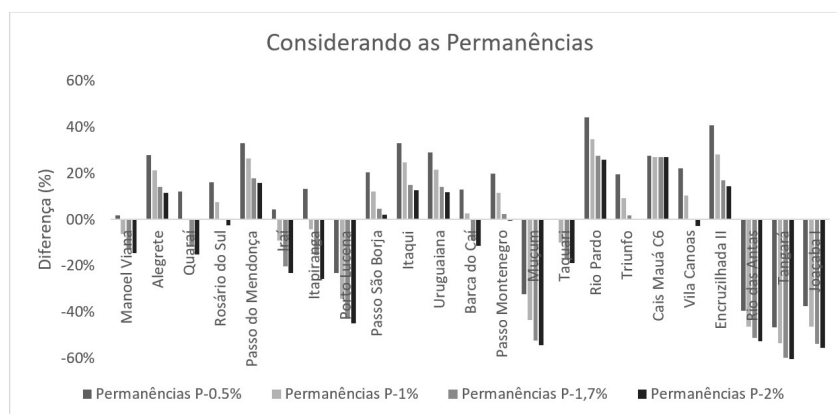
### 3.3.1 Permanências

Conforme brevemente mencionado anteriormente, considerando as permanências para estimar limiares de inundação, observa-se cotas estimadas mais adequadas utilizando as permanências de 1,7 e 2%, respectivamente. Para estas duas permanências foram notadas as menores diferenças entre as cotas estimadas e as atualmente utilizadas, com um total de 16 estações entre as 23 (total da amostra) com erros menores do que 20% utilizando a permanência de 1,7% e de 14 estações conspirando uma permanência de 2%.

Já as permanências de 0,5% e 1%, apresentaram valores melhores para alguns pontos, tais como Manoel Viana, Quarai, Iraí, Itapiranga e Barca do Cai. Além disso, ambas permanências, principalmente a de 0,5% foram melhores quando em comparação a permanências maiores, para os rios onde ocorre operação de usinas a montante: Rio das Antas, Tangará, Joaçaba I, Muçum e Taquari, além de Iraí, Itapiranga e Porto Lucena, mencionadas anteriormente.

Contudo, destaca-se que locais como Porto Lucena, Muçum, Taquari, Rio das Antas, Tangará e Joaçaba necessitam a utilização de permanências ainda menores para que sejam reduzidas as diferenças, conforme ilustrado na Figura 10. Por outro lado, em locais como Passo do Mendonça, Rio Pardo, Cais Mauá C6 e Encruzilhada II podem ter valores mais precisos quando na utilização de permanências maiores do que as utilizadas, ou seja, maiores do que 2%.

De modo geral, destaca-se que a utilização de curvas de permanência para estimativa de limiares de inundação apresentou resultados coerentes, podendo ser utilizadas para gerar boas estimativas. A permanência de 1,7% foi a que apresentou os melhores resultados para a maioria dos casos, ou seja, em um total de 23 amostras, onde 16 locais apresentaram diferenças entre a estimada e o valor atual de até 20%, entre estes 6 apresentaram diferenças menores do que 10%. Diferenças superiores a 20% foram observadas em 7 locais, os quais em sua maioria possuem operação de usinas hidrelétricas a montante, necessitando ser ajustados com a utilização de permanências menores.



**Figura 10** - Diferenças entre as cotas atuais monitoradas e as estimadas utilizando diferentes permanências (0,5%, 1%, 1,7% e 2%).

### 3.3.2 Tempos de Retorno

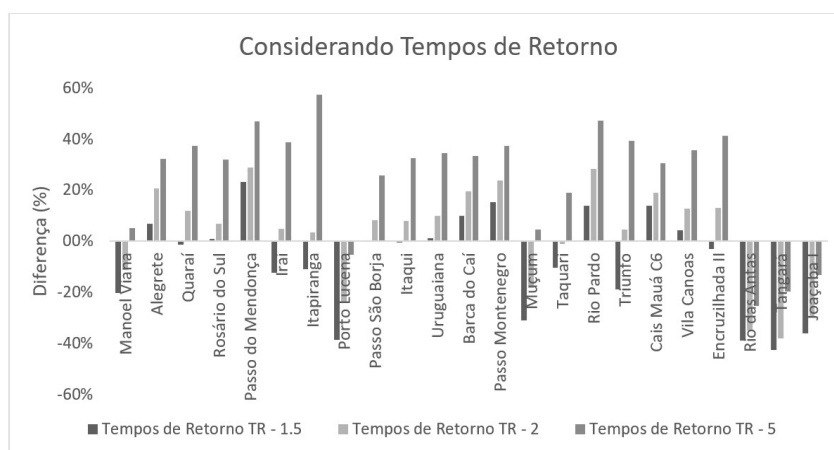
Com relação a utilização de tempos de retorno para estimativa de limiares de inundação, observa-se valores mais coerentes utilizando os valores de 1,5 e 2 anos, respectivamente. Para as cotas estimadas com um TR de 1,5 anos, 16 das 23 estações apresentaram diferenças menores do que 20% entre a cota estimada e as atualmente utilizadas, sendo 8 delas com erros inferiores a 10%.

Já a estimativa que considera a utilização de TR de dois anos, apresentou 15 estações com diferenças inferiores a 20%, sendo 7 delas com diferenças menores a 10%. Contudo, apesar de resultados semelhantes, a utilização de um TR de 1,5 apresentou estimativas mais aproximadas do que os 2 anos, conforme pode-se observar na Figura 11.

Para as estações Manoel Viana, Porto Lucena, Muçum, Rio das Antas, Tangará e Joaçaba I as cotas estimadas utilizando os tempos de retorno de 1,5 e 2 anos não foram adequadas. Nestes 6 casos, a utilização de um TR de 5 anos apresentou valores mais aproximados, principalmente nas estações Manoel Viana, Porto Lucena e Muçum onde as diferenças foram na ordem de aproximadamente 5%.

De modo geral, destaca-se que a utilização de tempos de retorno para estimativa de limiares de inundação, apresentaram resultados ainda melhores do que em comparação com as permanências. Cabe destaque para a utilização de um TR de 1,5 anos o qual possui melhores estimativas para a grande maioria dos casos analisados, porém em alguns rios com influência de operação de usinas, bem como em vales encaixados e locais com baixa ocupação populacional, a utilização de um TR de 5 anos é indicada.

Conforme Fernandez (2003) a descarga de margens plenas é o nível ou vazão em que preenche o canal antes de inundar. Considerando níveis e vazões que superem os de margens plenas, Wolman & Leopold (1957) sugerem tempos de retorno entre 1 a 2 anos, valores próximos aos descritos no presente trabalho, em igualdade aos valores descritos por Castilho et al. (1999) e Germano & Matos (2017), Dury (1973) e Hickin (1968), consideraram em seus estudos, tempos de retorno de 1,58 anos, também em consonância com os valores apresentados como ideais no presente trabalho.



**Figura 11** - Diferenças entre as cotas atuais monitoradas e as estimadas utilizando diferentes tempos de retorno.

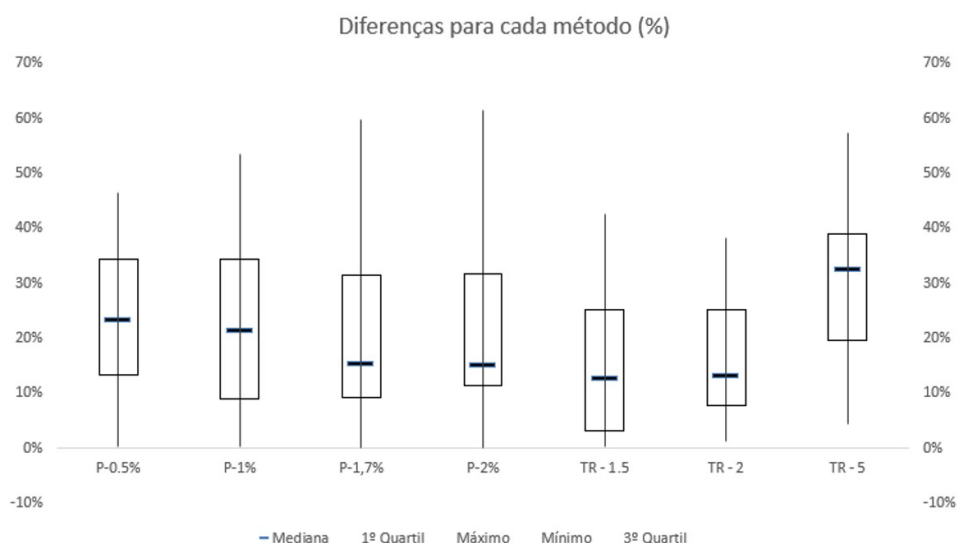
Williams (1978), analisou 51 cursos da água e concluiu que 75% destes locais apresentam cotas de inundação entre 1 e 5 anos, Leopold (1994) faz uma avaliação geral de diversos autores que buscam estimar valores das margens plenas e destaca que a maioria dos cientistas analisados descrevem valores com tempos de retorno entre 1 e 2,5 anos, salvo casos específicos a serem analisados pontualmente.

### 3.3.3 Avaliação geral das diferenças entre os métodos

A Figura 12 apresenta o boxplot comparativo com as diferenças percentuais entre as cotas atualmente utilizadas e as estimadas utilizando as permanências de 0,5%, 1%, 1,7% e 2%, os tempos de retorno de 1,5, 2 e 5 anos. Pode-se observar que os métodos com as menores diferenças ocorrem quando são utilizados os tempos de retorno de 1,5 e de 2 anos, onde as diferenças medianas foram de 12,5% e 13%, respectivamente. Além disso, ambos métodos apresentaram as menores diferenças de quartis: 3,2% e 7,8% para o primeiro quartil e 25,1% em ambos para o terceiro quartil.

Já o método que se utilizou da permanência de 1,7% apresentou diferenças pouco maiores do que em comparação aos TR de 1,5 e 2 anos. Com uma diferença mediana de 15%, primeiro quartil de 9,2% e 31% para o terceiro quartil. Destaca-se que o método que utilizou permanência de 2% apresentou diferenças semelhantes à de 1,7%.

Já os demais valores, ou seja, as permanências de 0,5% e 1%, além do TR de 5 anos apresentaram diferenças maiores em relação as demais bacias. Com estudos mais aprofundados talvez seja possível estabelecer uma relação de que eles podem ser utilizados em casos específicos, como por exemplo os de rios onde ocorre operação de usinas, bem como locais com baixa ocupação populacional.



**Figura 12** – Boxplot com as diferenças entre as cotas de inundação atuais monitoradas e as estimadas por cada método.

Em função de apresentar as menores diferenças e uma maior coerência em relação a grande maioria das estações analisadas, entende-se que o melhor método para a definição de limiares de inundação é através da utilização de um TR de 1,5 anos. Contudo este valor por ser considerado entre uma margem de 1,5 até 2 anos de tempo de retorno sem apresentar grandes diferenças.

Estes valores estão de acordo com os valores mencionados por Carpenter et al. (1999) o qual sugere uma enchente com tempo de retorno de 2 anos como um limite razoável para a maioria dos casos, podendo também serem utilizados em grandes bacias (Wolman & Leopold, 1957; Castilho et al., 1999; Germano & Matos, 2017; Dury, 1973; Hickin, 1968; Leopold, 1994). Contudo, destaca-se que a permanência de 1,7% também pode apresentar resultados tão bons quanto estes valores.

#### 4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Esta pesquisa apresentou e avaliou propostas de definição de limiares de inundação para múltiplos trechos de rio, especialmente visando à aplicação em modelos hidrológicos e sistemas de alerta de cheia. Os métodos também podem servir de estimativa preliminar para locais monitorados, ainda sem valor definido. Com base nos resultados obtidos, as principais conclusões são:

- considerar um TR de 1,5 ou 2 anos apresentou a maior coerência para a grande maioria dos casos, sendo o mais indicado a ser aplicado como limiar de cheia no contexto das aplicações propostas;
- o método estatístico através da vazão de permanência de 1,7% no tempo também apresentou resultados aceitáveis em termos de desempenho, em comparação com os demais testados.

Para utilização ideal e otimizada dos métodos apresentados, sugere-se um aprofundamento na prévia avaliação no comportamento hidrológico do rio em que se deseja estimar o limiar, antes que o TR ou permanência utilizados para estimativa do limiar de inundação desejado seja consolidado. Tal aprofundamento deve avaliar nos hidrogramas, principalmente se há influência de regularização nas vazões, possivelmente ocasionadas pela operação de usinas ou demais usos para que seja diferenciado se é um rio naturalizado ou não.

Para trabalhos futuros sugere-se um aprofundamento somente em rios onde há regularização nas vazões. Assim será possível aprofundar a definição de limiares para locais que são influenciados por operação de usinas em localidades a montante do ponto analisado, aumentando a amostra analisada neste trabalho e aprofundando o assunto considerando diferentes níveis de regularização, as quais podem afetar significativamente nos TR e permanências consideradas.



## 5 REFERÊNCIAS

- Alfieri, L., Pappenberger, F., & Wetterhall, F. (2014). The extreme runoff index for flood early warning in Europe. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 14(6), 1505.
- Alfieri, L., Salamon, P., Pappenberger, F., Wetterhall, F., & Thielen, J. (2012). Operational early warning systems for water-related hazards in Europe. *Environmental Science & Policy*, 21, 35-49. <http://dx.doi.org/10.1016/j.envsci.2012.01.008>.
- Carpenter, T. M., Sperflage, J. A., Georgakakos, K. P., Sweeney, T., & Fread, D. L. (1999). National threshold runoff estimation utilizing GIS in support of operational flash flood warning systems. *Journal of Hydrology*, 224, 21-44.
- Castilho, A. S., Silva, E. A., & Rodrigues, V. V. (1999). Estimativa do período de retorno associado às cotas de alerta de inundação e de grandes cheias na bacia do Rio Doce. In *XIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos* (pp. 1-19). Porto Alegre: Associação Brasileira de Recursos Hídricos.
- Defesa Civil do Estado de Santa Catarina. (2022). *Gestão de risco de desastres*. Florianópolis: Defesa Civil do Estado de Santa Catarina. Recuperado em 31 de março de 2023, de [https://www.defesacivil.sc.gov.br/images/doctos/seminarios/Gestao\\_de\\_RISCO\\_de\\_desastres\\_BAIXA.PDF](https://www.defesacivil.sc.gov.br/images/doctos/seminarios/Gestao_de_RISCO_de_desastres_BAIXA.PDF)
- Dury, G. H. (1973). Magnitude-frequency analysis and channel morphometry. In M. Marisawa (Ed.), *Fluvial geomorphology* (pp. 91-121). Nova York: Universidade do Estado de Nova York.
- Emergency Events Database – EM-DAT. (2022). *Disaster year in review 2012*. Recuperado em 30 de março de 2023, de <https://www.preventionweb.net/publication/2022-disasters-numbers>
- Fan, F. M., Pontes, P. R. M., Collischonn, W., & Buarque, D. C. (2016a). Sobre o uso da persistência de previsões determinísticas de vazão para a tomada de decisão. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 31(2), 218-228.
- Fan, F. M., Pontes, P. R. M., Collischonn, W., & Buarque, D. C. (2016b). Hydrological forecasting practices in Brazil. In T. E. Adams & T. C. Pagano (Eds.), *Flood forecasting: a global perspective* (Vol. 1, pp. 41-66). Amsterdam: Academic Press.
- Fernandez, O. V. Q. (2003). Determinação do nível e da descarga de margem plena em cursos fluviais. *Boletín Geográfico*, 21(1), 97-110.
- Germano, A., & Matos, A. J. S. (2017). Metodologia para definição de cotas de referência em sistemas de alerta e previsão hidrológica (pp. 1-8). In *XXII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos*. Florianópolis: Associação Brasileira de Recursos Hídricos.
- Goerl, R. F., Michel, G. P., & Kobiyama, M. (2017). Mapeamento de áreas susceptíveis a inundação com o modelo HAND e análise do seu desempenho em diferentes resoluções espaciais. *Revista Brasileira de Cartografia*, 69(1), 61-69.
- Gourley, J. J., Erlingis, J. M., Hong, Y., & Wells, E. B. (2012). Evaluation of tools used for monitoring and forecasting flash floods in the United States. *Weather and Forecasting*, 27, 158-173. <http://dx.doi.org/10.1175/WAF-D-10-05043.1>.
- Hickin, E. J. (1968). Channel morphology bankfull stage and bankfull discharge of streams near Sydney, Australia. *Journal of Science*, 30(7), 274-275.
- Krzysztofowicz, R., & Davis, D. R. (1983). Category-unit loss functions for flood forecast-response system evaluation. *Water Resources Research*, 19(6), 1476-1480.
- Leopold, L. B. (1994). *A view of the river*. Cambridge: Harvard University Press.
- Leopold, L. B., & Maddock, T. (1953). *The hydraulic geometry of stream channels and some physiographic implications*. Washington: US Government Printing Office.
- Lombardi, A., Colaiuda, V., Verdecchia, M., & Tomassetti, B. (2021). User-oriented hydrological indices for early warning system with validation using post-event surveys: flood case studies on the Central Apennines District. *Hydrology and Earth System Sciences*, 25(4), 1969-1992.
- Moore, R. J., Bell, V. A., & Jones, D. A. (2005). Forecasting for flood warning. *Comptes Rendus Geoscience*, 337(1-2), 203-217. <http://dx.doi.org/10.1016/j.crte.2004.10.017>.
- Norbiato, D., Borga, M., & Dinale, R. (2009). Flash flood warning in ungauged basins by use of the flash flood guidance and model-based runoff thresholds. *Meteorological Applications*, 16(1), 65-75.
- Secretaria do Meio Ambiente e Infraestrutura do Estado do Rio Grande do Sul – SEMA-RS. (2023). Recuperado em 22 de maio de 2023, de <http://www.saladesituacao.rs.gov.br/>
- Serviço Geológico do Brasil – CPRM. (2023). SACE. Recuperado em 22 de maio de 2023, de [http://www.cprm.gov.br/sace/index\\_bacias\\_monitoradas.php?getbacia=buruguai](http://www.cprm.gov.br/sace/index_bacias_monitoradas.php?getbacia=buruguai)
- Tucci, C. E. M. (2012). *Hidrologia: ciência e aplicação*. Porto Alegre: Editora da UFRGS/ABRH.

- Universidade Federal do Paraná – UFPR. (2023). *Métodos de reamostragem*. Recuperado em 20 de março de 2023, de [http://cursos.leg.ufpr.br/ML4all/apoio/reamostragem.html#\\_m%C3%A9todos\\_de\\_reamostragem\\_](http://cursos.leg.ufpr.br/ML4all/apoio/reamostragem.html#_m%C3%A9todos_de_reamostragem_)
- Villela, S. M., & Mattos, A. (1975). *Hidrologia aplicada*. São Paulo: McGraw-Hill.
- Williams, G. P. (1978). Bank-full discharge of rivers. *Water Resources Research*, 14(6), 1141-1154.
- Wolman, M. G., & Leopold, L. B. (1957). *River flood plains: some observations on their formation*. Washington: United States Government Printing Office.
- Zsoter, E., Prudhomme, C., Stephens, E., Pappenberger, F., & Cloke, H. (2020). Using ensemble reforecasts to generate flood thresholds for improved global flood forecasting. *Journal of Flood Risk Management*, 13(4), e12658.

#### **Contribuições dos autores:**

Lucas Verino Zanella Giacomelli: concepção e execução da metodologia, pesquisa e estruturação de conceitos, busca, análise e apresentação de dados e resultados, redação do artigo.

Fernando Mainardi Fan: orientação, concepção da metodologia, estruturação do trabalho e revisões.

Fernando Comerlato Scottá: elaboração de mapas e figuras, revisões e pesquisa por conceitos.