

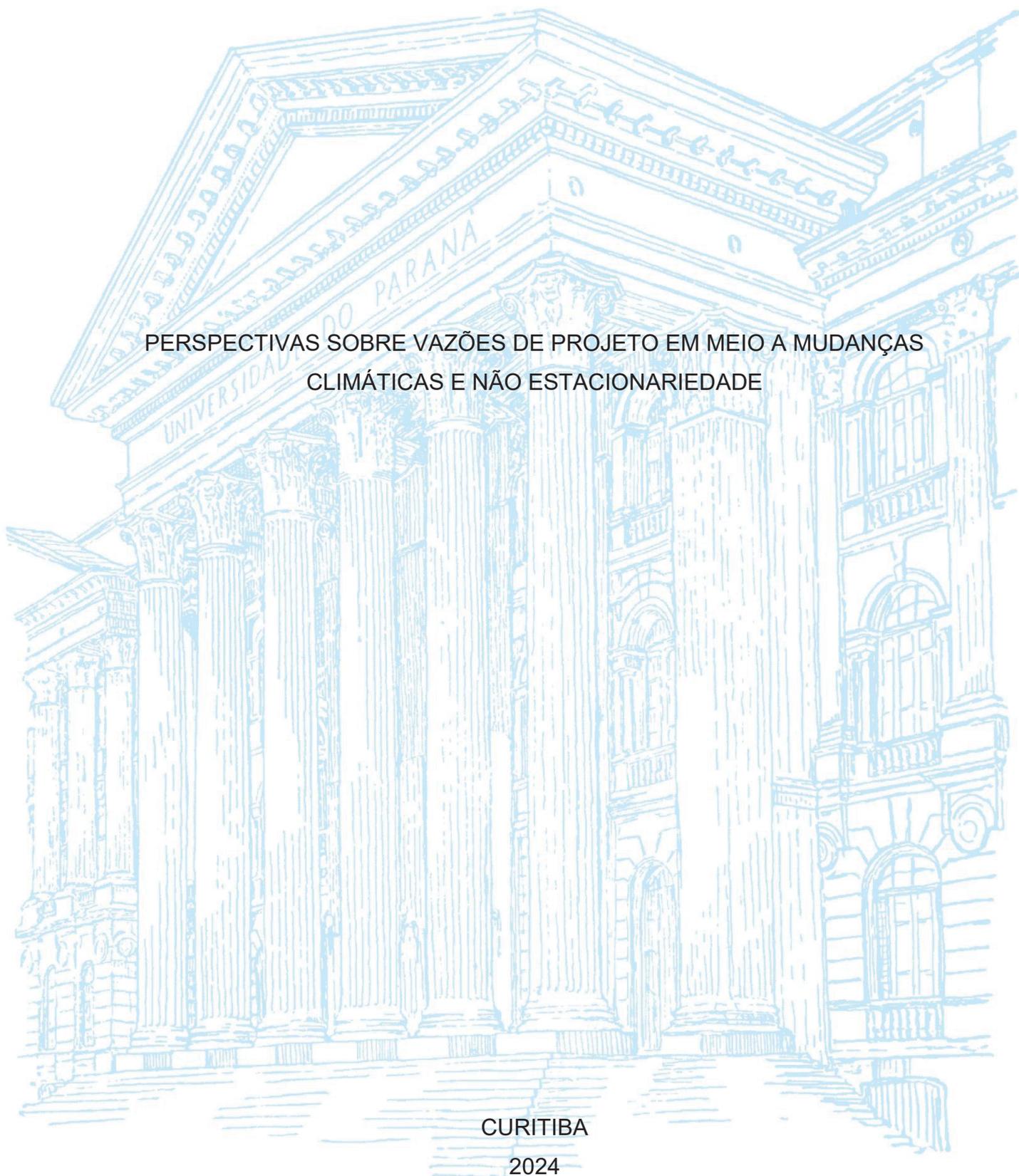
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

LAÍS MARIANA WOSNIACK

PERSPECTIVAS SOBRE VAZÕES DE PROJETO EM MEIO A MUDANÇAS
CLIMÁTICAS E NÃO ESTACIONARIEDADE

CURITIBA

2024



LAÍS MARIANA WOSNIACK

PERSPECTIVAS SOBRE VAZÕES DE PROJETO EM MEIO A MUDANÇAS
CLIMÁTICAS E NÃO ESTACIONARIEDADE

Dissertação apresentada ao curso de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. Daniel Henrique Marco Detzel

CURITIBA

2024

DADOS INTERNACIONAIS DE CATALOGAÇÃO NA PUBLICAÇÃO (CIP)
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
SISTEMA DE BIBLIOTECAS – BIBLIOTECA DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA

Wosniack, Laís Mariana

Perspectivas sobre vazões de projeto em meio a mudanças climáticas e não estacionariedade / Laís Mariana Wosniack. – Curitiba, 2024.

1 recurso on-line : PDF.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental.

Orientador: Daniel Henrique Marco Detzel

1. Extremos climáticos. 2. Mudanças climáticas. 3. Vazão – Medidores. I. Universidade Federal do Paraná. II. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental. III. Detzel, Daniel Henrique Marco. IV. Título.

Bibliotecário: Elias Barbosa da Silva CRB-9/1894

TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação ENGENHARIA DE RECURSOS HÍDRICOS E AMBIENTAL da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da dissertação de Mestrado de **LAÍS MARIANA WOSNIACK** intitulada: **Perspectivas sobre Vazões de Projeto em Meio a Mudanças Climáticas e Não Estacionariedade**, sob orientação do Prof. Dr. DANIEL HENRIQUE MARCO DETZEL, que após terem inquirido a aluna e realizada a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua APROVAÇÃO no rito de defesa.

A outorga do título de mestra está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

CURITIBA, 20 de Dezembro de 2024.

Assinatura Eletrônica

10/01/2025 11:54:51.0

DANIEL HENRIQUE MARCO DETZEL

Presidente da Banca Examinadora

Assinatura Eletrônica

26/12/2024 10:16:57.0

DANIELI MARA FERREIRA

Avaliador Externo (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANA- CURITIBA)

Assinatura Eletrônica

27/12/2024 17:27:14.0

MARCELO RODRIGUES BESSA

Avaliador Interno (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

AGRADECIMENTOS

Agradeço imensamente a minha família por todo o incentivo fornecido durante esse período desafiador: meus pais, Edilton e Susana, meus irmãos, André, Isabella e Marina, minha nona Iolanda e meu tio Gilmar, sem esquecer o apoio do meu fiel escudeiro Cisco, que tantas vezes me proporcionou alívio cômico.

Agradeço principalmente ao Andrey, que sempre esteve presente para me ajudar a seguir em frente, e que não mediu esforços para deixar a minha vida mais leve e mais feliz ao longo dessa jornada.

Agradeço aos meus amigos, pelo apoio e inúmeras conversas motivacionais para seguir em frente.

Agradecimentos especiais ao Nicolas Lopardo e ao Luciano Penido, por toda a paciência para me ensinar a desbravar a área de recursos hídricos, e principalmente por me incentivarem a ir em busca desse mestrado.

Agradeço sobretudo ao professor Daniel Detzel, pela mentoria e confiança no meu trabalho, e fundamentalmente pela motivação para encarar tantos desafios com boa disposição e tranquilidade.

Resiliência.

RESUMO

A estimativa adequada de eventos hidrológicos extremos é essencial para o dimensionamento e a verificação das condições de segurança de estruturas hidráulicas, em especial para obras de grande porte com potencial de danos socioeconômicos severos em caso de falha. Os eventos climáticos extremos se tornaram mais intensos e mais frequentes do que o que era observado no período pré-industrial, principalmente devido a intensificação do ciclo hidrológico dada a maior capacidade da atmosfera de reter vapor de água com a elevação na temperatura média global, em detrimento dos efeitos das mudanças climáticas. Diante do clima atual, crescem as incertezas para estimar magnitudes hidrológicas com alta recorrência, tanto pela perspectiva da utilização dos modelos computacionais que incorporam os cenários de aquecimento da superfície terrestre, quanto pela aplicação convencional de métodos estatísticos em séries históricas. Ao simular os efeitos das mudanças climáticas em projeções hidrológicas, as incertezas se associam a grande variedade de modelos climáticos disponíveis, com escalas espaciais distintas, gerados a partir de diferentes cenários de emissões de gases de efeito estufa, e, caso o objetivo seja o mapeamento de áreas suscetíveis a inundação, as condições de umidade antecedente do solo também exercem influência nos resultados. Em contrapartida, para estimar magnitudes com alta recorrência considerando apenas os registros históricos de determinada série hidrológica, existe a possibilidade de que os dados apresentem tendência temporal, em razão dos efeitos das ações antrópicas sobre o ciclo hidrológico. Com isso, há um problema conceitual na abordagem tradicionalmente adotada por análises de frequência de eventos extremos, que faz uso de métodos estatísticos fundamentados no princípio da estacionariedade, ou seja, de que os momentos estatísticos independem do tempo. Considerando a importância da determinação de vazões de alta recorrência para a avaliação de risco de obras hidráulicas, as condições de estacionariedade nas séries de vazões máximas anuais afluentes a 152 usinas hidrelétricas (UHEs) brasileiras foram avaliadas. Para tanto, foi utilizado o teste de Mann Kendall, na variante *trend-free prewhitening*, através do qual foram identificados indícios de não estacionariedade em 70 séries afluentes de UHEs, que no geral apresentaram mudanças abruptas na década de 90, conforme resultados obtidos com o teste de Pettitt. O método *Empirical Quantile Mapping* (EQM), geralmente utilizado para correção de viés em cenários de mudanças climáticas, é proposto como modelo de correção da não estacionariedade nas séries de vazões máximas anuais das UHEs com tendência temporal. Os resultados obtidos com o método EQM foram comparados aos do método da curva acumulativa de vazões, e da alternativa de truncamento da série histórica contida no período após a mudança abrupta nos dados. De modo geral, as vazões decamilenares estimadas pelos diferentes métodos de correção da não estacionariedade divergem entre si, mas para as UHEs Barra Bonita, Capivara, Itaúba, Moxotó, P. Afonso, Salto Caxias, Salto Osório, Salto Santiago e Xingó, os resultados convergiram para o cenário alarmante, de que as vazões de projeto adotadas para o dimensionamento dos vertedores existentes estão possivelmente subdimensionadas em contexto de não estacionariedade.

Palavras-chave: eventos extremos; não estacionariedade; mudanças climáticas; vazão de projeto; *Empirical Quantile Mapping*.

ABSTRACT

Adequate estimation of hydrological extremes is essential for designing and assessing the safety conditions of hydraulic structures, particularly for major infrastructure with potential for severe socio-economic impacts in case of collapse. The frequency and intensity of extreme hydrological events are higher than what was observed during the pre-industrial era, overall caused by the intensification of the hydrological cycle, given the increase of water-holding capacity in the atmosphere at higher temperatures due to global warming. At the current climate, the uncertainties regarding the estimation of hydrological values with high recurrence period are higher, either from the approach based on computational models that simulates the Earth's surface warming scenarios, or through the conventional statistical analysis that uses time series. The uncertainties in simulating the effects of climate change on hydrological projections are associated with the wide variety of climate models available, at different spatial scales, generated from a range of greenhouse gas emission scenarios and, if the aim is to map areas susceptible to flooding, the antecedent soil moisture conditions also influence the results. Meanwhile, when estimating high recurrence values considering only the historical records of a given hydrological series, there is a possibility that the data will show a trend, given the effects of anthropogenic actions on the hydrological cycle. Thus, there is a conceptual problem with the conventional approach to analyze the frequency of extreme events, which uses statistical methods based on the principle of stationarity, i.e. that the statistical properties are independent of time. Since it is crucial to determine high recurrence streamflow to assess the risk of hydraulic infrastructure, the stationarity conditions for the maximum annual daily streamflow at 152 hydropower plants (HPPs) in Brazil were evaluated. For this purpose, the Mann Kendall test was used, in the trend-free prewhitening form, which revealed signs of non-stationarity in 70 series of HPPs inflows, which overall showed abrupt changes in the 1990s, according to the results obtained with the Pettitt test. The Empirical Quantile Mapping (EQM) method, often used to correct bias in climate change scenarios, is proposed as a model for correcting non-stationarity in the maximum annual streamflow series of HPPs that showed time trends. The results obtained with the EQM method were compared to those of the cumulative flow curve method and the alternative of truncation the historical series contained in the period after the abrupt change in data. Overall, the 10,000-year flows estimated through different methods of correcting non-stationarity deviated from each other, but for the Barra Bonita, Capivara, Itaúba, Moxotó, P. Afonso, Salto Caxias, Salto Osório, Salto Santiago and Xingó HPPs, the results led to the alarming scenario that the design flows adopted for designing the existing spillways are possibly undersized in the non-stationarity context.

Keywords: extreme events; non-stationarity; climate changes; design flow; Empirical Quantile Mapping.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	9
2 INUNDAÇÃO FLUVIAL EM CONTEXTO DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS: UMA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA – ARTIGO 1	12
3 VAZÃO DE PROJETO DE USINAS HIDRELÉTRICAS NO BRASIL EM CONTEXTO DE NÃO ESTACIONARIEDADE – ARTIGO 2	23
4 CONCLUSÃO.....	56
REFERÊNCIAS.....	59
APÊNDICE 1 – INFORMAÇÕES BÁSICAS DAS USINAS HIDRELÉTRICAS SELECIONADAS PARA AVALIAÇÃO DA CONDIÇÃO DE ESTACIONARIEDADE.....	67
APÊNDICE 2 – ESTATÍSTICA DO TESTE MK-TFPW PARA IDENTIFICAÇÃO DAS SÉRIES AFLUENTES COM COMPORTAMENTO NÃO ESTACIONÁRIO	71
APÊNDICE 3 – ESTATÍSTICA DO TESTE KS PARA AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DO AJUSTE DAS SÉRIES HIDROLÓGICAS COM A DISTRIBUIÇÃO DE PROBABILIDADE GEV	72
APÊNDICE 4 – AJUSTE DE EXTREMOS DAS SÉRIES HIDROLÓGICAS	74
APÊNDICE 5 – REGRESSÃO LINEAR SIMPLES - UHE'S ESTATISTICAMENTE NÃO ESTACIONÁRIAS	106
APÊNDICE 6 – COMPARATIVO ENTRE VAZÕES DE PROJETO EM CONTEXTO NÃO ESTACIONÁRIO	115

1 INTRODUÇÃO

As usinas hidrelétricas (UHEs) constituem empreendimentos de grande porte, sobre os quais residem interesses sociais e econômicos de nível nacional, por isso é essencial que as condições de segurança dessas estruturas sejam garantidas para reduzir a possibilidade de acidentes.

Conforme a Agência Nacional de Águas (ANA, 2021), o galgamento de barragens ocasionado por chuvas intensas é a principal causa de acidentes ou incidentes registrados no Brasil. Em maio de 2024, as UHEs Dona Francisca, Castro Alves e Monte Claro permaneceram em estado de atenção, enquanto as UHEs Bugres e 14 de Julho entraram em estado de emergência em decorrência das chuvas intensas registradas no Rio Grande do Sul, que resultaram no galgamento e no rompimento parcial do maciço da UHE 14 de Julho (BRASIL, 2024).

Durante este evento hidrológico extremo, foram registradas cheias recordes em diversos rios do Rio Grande do Sul, dentre os quais se destacam os rios Jacuí, Guaíba, Taquari, Caí, Sinos e Pardo. Poucos meses antes, em 2023, outro evento hidrológico de grande magnitude resultou em cheias recordes no rio Taquari-Antas. Em razão destes eventos, os aproveitamentos hidrelétricos dessa região e que foram dimensionados para resistir a cheias decamilenares registraram vazões máximas próximas ou superiores à vazão de projeto, como a UHE Castro Alves (rio das Antas), UHE Dona Francisca (rio Jacuí) e a Pequena Central Hidrelétrica (PCH) Salto do Forqueta (rio Forqueta) (PAIVA *et al.* 2024).

A recorrência elevada de eventos climáticos extremos no Sul do Brasil não constitui uma situação isolada, mas sim um padrão que tem sido observado em diversas regiões do planeta ao longo das últimas décadas, em razão dos efeitos do aquecimento global sobre o ciclo hidrológico.

De acordo com o Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC, 2021), para determinado evento diário de forte precipitação, sob condições de equilíbrio e sem a interferência humana, era esperado que o mesmo ocorresse em média uma vez a cada dez anos. Sob as condições atuais, em que a superfície terrestre aqueceu cerca de 1°C em relação ao período pré-industrial, a precipitação diária intensa provavelmente ocorre 1,3 vezes no período de 10 anos, com intensidade 6,7% maior do que no passado. Caso o aumento na temperatura chegue em 4°C, o

mesmo evento diário de precipitação intensa pode ocorrer 2,7 vezes no período de 10 anos com intensidade 30,2% maior.

O aumento na intensidade e frequência de eventos de precipitação extrema está relacionado a maior oferta de vapor de água disponível na atmosfera para ser precipitado em razão das temperaturas mais elevadas, seguindo a relação da termodinâmica de Clausius-Clapeyron (TRENBERTH, 2011). Estima-se que a cada grau centígrado de aquecimento, a precipitação média anual no planeta deve crescer de 1,5 a 2,5%, enquanto os eventos extremos devem crescer em taxa superior, de 4 a 10% (KHARIN *et al.*, 2013).

Os impactos nocivos relacionados aos efeitos das mudanças climáticas podem ser mitigados através de estimativas assertivas acerca da magnitude e a recorrência de determinado evento extremo. Desta forma, pode-se mapear áreas suscetíveis a inundações representativas, projetar estruturas resilientes e adequar infraestruturas existentes para resistirem às tendências dos fenômenos naturais.

Tradicionalmente, a vazão de projeto de UHEs é definida por métodos estatísticos que correlacionam o porte da estrutura e o risco potencial associado em caso de colapso com determinada probabilidade ínfima de ocorrência de sinistro. Os métodos estatísticos mais empregados assumem que os processos hidrológicos são estacionários, mas essa premissa pode não ser verdadeira em razão dos efeitos do aquecimento global sobre o ciclo hidrológico, das ações antrópicas de exploração e gerenciamento de recursos hídricos, e dos efeitos do manejo e utilização do solo.

Diante deste contexto, o objetivo principal dessa dissertação é determinar a vazão de projeto para as UHEs brasileiras controladas pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) que apresentam tendência em suas respectivas séries afluentes de vazões máximas anuais, em contexto não estacionário.

Em relação aos objetivos específicos, tem-se:

- Identificar como as mudanças climáticas podem impactar o ciclo hidrológico e ser incorporadas no mapeamento de áreas de risco de inundação;
- Avaliar a premissa da estacionariedade nas séries de vazões máximas afluentes às UHEs do ONS;
- Aplicar e comparar dois métodos de correção da não estacionariedade;
- Determinar as vazões de projeto para as séries históricas não estacionárias e as séries com a estacionariedade corrigida;

- Identificar quais UHEs apresentam vazão de projeto subdimensionada no contexto não estacionário.

Esta dissertação é estruturada no formato alternativo, com dois artigos apresentados no lugar dos capítulos que compõem a estrutura convencional de trabalhos acadêmicos. O primeiro artigo aborda a incorporação das mudanças climáticas no mapeamento de áreas suscetíveis a inundações, enquanto o segundo artigo foca na determinação da vazão de projeto das UHEs com afluições com indícios de não estacionariedade. Ao final do documento são apresentadas as principais conclusões da pesquisa.

**2 INUNDAÇÃO FLUVIAL EM CONTEXTO DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS: UMA
REVISÃO BIBLIOGRÁFICA – ARTIGO 1**

XXV SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS

INUNDAÇÃO FLUVIAL EM CONTEXTO DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS: UMA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Laís Mariana Wosniack¹ ; Daniel Henrique Marco Detzel²

Resumo: As mudanças climáticas são responsáveis por intensificar o ciclo hidrológico devido à maior capacidade da atmosfera de reter vapor d'água com a elevação da temperatura, aumentando a frequência e a intensidade dos eventos de precipitação extrema. As inundações fluviais acontecem como resultado destes eventos extremos, mas sua magnitude também depende de outros fatores físicos, como a umidade antecedente do solo e o tipo de cobertura do solo. Existem muitas incertezas envolvidas no mapeamento de áreas suscetíveis a inundações sob os efeitos do aquecimento global, desde os modelos climáticos e os cenários de emissões de gases de efeito estufa adotados, até as escalas espaciais das projeções realizadas, que podem manifestar padrões divergentes quando submetidos às mesmas forçantes radiativas. Apesar da importância do tema, foram publicados poucos estudos que associam os cenários de mudanças climáticas com as inundações fluviais. Neste sentido, o presente artigo traz uma revisão bibliográfica acerca dos estudos publicados em revistas internacionais neste tema, abrangendo uma contextualização do aquecimento global e os caminhos de emissões de gases de efeito estufa, os efeitos causados na precipitação e as tendências encontradas nas inundações fluviais em diferentes escalas espaciais.

Abstract: Climate change is responsible for intensifying the hydrological cycle due to an increase in water-holding capacity of the atmosphere as temperatures warm, increasing the frequency and intensity of extreme precipitation events. River floods occur as a result of these extreme events, but their magnitude also depends on other physical factors, such as antecedent soil moisture and land cover. There are many uncertainties surrounding river flooding under the effects of global warming, from the climate models and greenhouse gas emission scenarios adopted, to the spatial scales of the projections made, which may manifest contrasting patterns when subjected to the same radiative forcings. Despite the importance of the topic, few studies associating climate change scenarios with river flooding have been published. In this regard, the present article brings a literature review about the studies published in international journals on this subject, covering a contextualization of global warming and the paths of greenhouse gas emissions, the effects caused on precipitation, and the trends found in river flooding at different spatial scales.

Palavras-Chave – inundação fluvial, mudanças climáticas, eventos extremos.

1) Mestranda em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental (PPGERHA), Universidade Federal do Paraná, Campus Centro Politécnico, Curitiba, PR. laismw@gmail.com

2) Professor do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental (PPGERHA), Departamento de Hidráulica e Saneamento, Universidade Federal do Paraná, Campus Centro Politécnico, Curitiba, PR. detzel@ufpr.br

INTRODUÇÃO

Ao longo das últimas décadas as inundações se tornaram mais frequentes, e atualmente são consideradas como um dos desastres naturais mais custosos e mais comuns de ocorrer (RAZAVI *et al.*, 2020). Uma forma de classificar as inundações é através do principal mecanismo de geração do desastre, dentre os quais se destacam fluvial, pluvial, costeira, derretimento de neve e rompimento de barragem (WASKO *et al.*, 2021b).

A inundação fluvial, como o nome sugere, provém do transbordamento do nível d'água dos corpos hídricos para a área de várzea, e são causadas principalmente por eventos de precipitação intensa. São desastres naturais que podem perdurar por dias ou semanas, a depender do tamanho da bacia hidrográfica e da intensidade precipitada (GUAN *et al.*, 2023).

No cenário global, cerca de 58 milhões de pessoas são expostas às inundações fluviais anualmente, que em média são responsáveis por provocar 5.700 mortes por ano. Os prejuízos financeiros diretamente provocados por inundações fluviais custam em média €110 bilhões por ano no planeta, mas estima-se que com a elevação de 1,5 °C da temperatura até o final do século XXI os danos possam chegar a €375 bilhões por ano (DOTTORI *et al.*, 2018).

O aumento observado dos prejuízos físicos e materiais causados por inundações está relacionado com a ocupação popular de áreas de várzea, com o crescimento geral da população e da riqueza, bem como pelo aumento na frequência de eventos climáticos extremos devido ao aquecimento global (JONGMAN *et al.*, 2012).

Alterações na intensidade ou na frequência de inundações fluviais podem provocar danos severos na infraestrutura de diversas obras de engenharia, como em pontes, barragens, diques ou galerias pluviais, sendo de extrema importância a compreensão adequada dos fenômenos naturais e suas probabilidades de ocorrência a fim de proporcionar medidas de mitigação condizentes aos riscos atrelados (WASKO *et al.*, 2021b).

Diante deste cenário, é indispensável melhorar o entendimento sobre o comportamento esperado de inundações fluviais considerando o aquecimento da superfície terrestre para aperfeiçoar os projetos de infraestrutura existentes ou em fase de concepção. Logo, o presente artigo pretende revisar trabalhos de relevância técnico-científica publicados a partir de 2010 na temática de mudanças climáticas e inundações fluviais. A revisão bibliográfica inicia com um panorama dos cenários de aquecimento global, seguida por uma avaliação dos seus efeitos causados na precipitação e finalmente apresenta os estudos que relacionam as mudanças climáticas com as inundações fluviais.

CENÁRIOS DE AQUECIMENTO DA SUPERFÍCIE TERRESTRE

Desde o período pré-industrial, entre os anos 1850 e 1900, as ações antrópicas que contribuem para a emissão de gases de efeito estufa foram responsáveis pelo aumento de 1,09 °C na temperatura superficial do planeta. Mesmo considerando um cenário de baixas emissões de gases de efeito estufa no curto prazo, a probabilidade de que o aquecimento global atinja ou exceda 1,50 °C até 2040 é superior a 50% (IPCC, 2022).

Para simular as possíveis consequências climáticas que podem acontecer até o final deste século, o 5º Relatório de Mudanças Climáticas elaborado em 2014 pelo Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC, sigla em inglês) teve foco em quatro cenários de concentração equivalente de CO₂ na atmosfera até o ano 2100, denominados de Caminhos Representativos de Concentração (RCP, sigla em inglês) (IPCC, 2021). Esses cenários consideram os impactos que as emissões dos gases de efeito estufa devem causar no balanço de radiação do sistema terrestre, e são identificados por sua forçante radiativa total que pode ser atingida até 2100, que varia de 2,6, 4,5, 6,0 a 8,5 W/m² (MOSS *et al.*, 2010).

O RCP2.6 equivale a um cenário otimista com mitigação rigorosa, que considera a implementação de políticas climáticas para manter o aquecimento global abaixo de 2 °C, quando comparado à temperatura do período pré-industrial. Os cenários RCP4.5 e RCP6.0 são intermediários, e o RCP8.5 é o cenário pessimista, caracterizado pelo aumento das emissões de gases de efeito estufa ao longo do tempo, resultando em níveis de concentração muito altos (MOURA *et al.*, 2018).

Com o desenvolvimento do 6º Relatório de Mudanças Climáticas foram divulgados pelo IPCC (2021) os novos cenários de emissões que consideram diferentes premissas socioeconômicas, denominados de Caminhos Socioeconômicos Compartilhados (SSP, sigla em inglês), que resultam em níveis de forçamento radioativo semelhantes aos dos seus cenários predecessores (RCP).

São quatro cenários SSP que correspondem a uma atualização dos RCP anteriores: SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP4-6.0 e SSP5-8.5. Além destes, outros quatro cenários SSP foram introduzidos:

- SSP1-1.9: cenário representativo do Acordo de Paris, que considera a implementação de políticas climáticas para limitar o aquecimento global a 1,5 °C acima da temperatura média do período pré-industrial até o ano de 2100;
- SSP3-7.0: cenário intermediário entre RCP6.0 e RCP8.5, resultante da não implementação de políticas de mitigação das emissões;
- SSP4-3.4: cenário intermediário entre RCP2.6 e RCP4.5, no qual ocorre redução dos gases de efeito estufa, mas não em quantidade suficiente para conseguir limitar o aquecimento global a 2 °C;
- SSP5-3.4: cenário em que as emissões são muito elevadas até 2040, seguidas por forte redução até atingir os mesmos níveis de forçamento radiativa do SSP1-2.6 no século XXII.

Para representar matematicamente o sistema climático terrestre foram desenvolvidos os Modelos Climáticos Globais (GCM, sigla em inglês), que são capazes de analisar o impacto das forçantes no sistema climático e realizar as projeções climáticas em várias escalas de tempo. Lima (2014) explica que se trata de modelos computacionais responsáveis por realizar aproximações numéricas de equações matemáticas que representam as leis físicas que governam a movimentação da atmosfera e as suas interações com a superfície do sistema (criosfera, biosfera, hidrosfera e litosfera). O mesmo autor ainda informa que atualmente esses modelos são a área da ciência que mais demanda esforço computacional, devido a simulação do comportamento de diversas variáveis no tempo que estão em constante evolução para representar toda a física e a dinâmica da atmosfera.

Devido à baixa resolução dos GCMs não é possível analisar os impactos das mudanças climáticas em escala local. Contudo, através da redução da escala espacial (*downscaling*) dos modelos climáticos globais em determinada região específica são obtidos os chamados Modelos Climáticos Regionais (RCM, sigla em inglês), que possuem melhor detalhamento nas escalas regionais e locais (CHOU *et al.*, 2014).

No 4º Relatório de Avaliação do IPCC foram introduzidos os Modelos Acoplados de Circulação Geral Atmosfera-Oceano (AOGCM, sigla em inglês), responsáveis por elaborar projeções baseadas nas forçantes de gases de efeito estufa e aerossóis sobre a dinâmica das componentes físicas do sistema climático. No 5º Relatório de Avaliação do IPCC foram apresentados os Modelos do Sistema Terrestre (ESM, sigla em inglês), que equivalem a uma atualização dos AOGCMs com a inclusão da representação de ciclos biogeoquímicos, importantes para simular respostas climáticas mais detalhadas devido à ação de forças externas (LIMA, 2014).

Como cada modelo climático global foi desenvolvido com parametrizações de códigos únicos, as projeções realizadas com as mesmas forçantes produzem respostas globais qualitativamente parecidas, mas com magnitudes e padrões distintos. O Projeto de Intercomparação de Modelos Acoplados (CMIP, sigla em inglês) é responsável por coordenar e padronizar essas projeções climáticas para analisar os efeitos das mudanças climáticas. Atualmente está na Fase 6 (CMIP6), e

sua metodologia utiliza os SSPs para realizar as projeções climáticas futuras, que podem se estender para além do ano de 2100. A Fase 5 (CMIP5) foi utilizada no 5º Relatório de Avaliação do IPCC, e utilizava os cenários RCPs nas projeções (TEBALDI *et al.*, 2021).

EFEITOS DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS NA PRECIPITAÇÃO

Nas últimas décadas foram conduzidos diversos estudos para avaliar o impacto que o aquecimento global exerce sobre o ciclo hidrológico, com entendimento para o aumento na frequência e na intensidade dos eventos extremos de precipitação (IPCC, 2021; KHARIN *et al.*, 2013; MARENGO, 2014; MOURA *et al.*, 2018; SUN *et al.*, 2021; TABARI, 2021; TRENBERTH, 2011; WASKO *et al.*, 2021; XAVIER *et al.*, 2020).

Se não houvesse interferência antropogênica no clima, determinado evento diário de forte precipitação deveria acontecer em média uma vez a cada dez anos, mas uma estimativa do (IPCC, 2021) considerando a elevação de 1 °C na temperatura global aponta que o mesmo evento provavelmente pode ocorrer 1,3 vezes no mesmo período e com intensidade 6,7% superior à do passado. Caso a elevação na temperatura chegue a 4 °C, este mesmo evento pode ocorrer 2,7 vezes nos mesmos dez anos e com intensidade 30,2% maior.

Os autores Sun *et al.* (2021) analisaram as tendências nas precipitações anuais máximas em diferentes escalas espaciais: local, regional e global, através de análise estatística com os dados de precipitação e temperatura disponíveis para os anos de 1900-2018 das diversas fontes que contribuíram para a base HadEX2, e incorporam com mais dados do acervo de medições da China. Com isso, obtiveram uma correlação estatística significativa entre as precipitações extremas e a temperatura média da superfície global, e determinaram que para cada 1 °C de elevação na temperatura a precipitação extrema sofre uma mudança de 6,6% para a precipitação anual máxima acumulada em 1 dia, e uma mudança de 5,7% para a precipitação anual máxima acumulada em 5 dias consecutivos.

Esses resultados são muito próximos do que era esperado da intensificação na precipitação pela relação da termodinâmica de Clausius-Clapeyron (C-C), que descreve a capacidade da atmosfera de reter umidade em função da temperatura. Valores teóricos indicam cerca de 7% de aumento na retenção de vapor d'água da atmosfera para cada 1 °C de aquecimento, o que permite explicar a maior intensidade dos eventos de precipitação com o aquecimento global, pois esse processo aumenta a oferta de vapor d'água disponível na atmosfera para ser precipitado (TRENBERTH, 2011).

Com mais vapor d'água disponível para ser precipitado, bem como o aumento na evaporação e evapotranspiração devido a elevação da temperatura, o ciclo hidrológico acelera (ou se intensifica) com a maior troca de água entre a atmosfera e a superfície terrestre. A intensificação do ciclo hidrológico altera os padrões de circulação da atmosfera e provoca projeções de precipitação mais voláteis, com diversas regiões do planeta sujeitas a períodos de seca mais longos intercalados por eventos de precipitação intensa (IPCC, 2022).

INUNDAÇÃO FLUVIAL CONSIDERANDO AS MUDANÇAS CLIMÁTICAS

O último Relatório Especial sobre Gerenciamento de Riscos de Eventos Extremos e Desastres para Promover Adaptação à Mudança do Clima (SREX, sigla em inglês) divulgado em 2012 pelo IPCC classificou que existe baixa confiança nas projeções de mudanças em inundações fluviais ocasionadas pelo aquecimento global, em detrimento das evidências limitadas e dos mecanismos regionais complexos que governam o processo (IPCC, 2012).

No ano seguinte à publicação do SREX, os autores Hirabayashi *et al.* (2013) discorreram que a principal motivação da baixa confiança nas projeções do IPCC se devia principalmente ao estudo da

época ter sido conduzido utilizando apenas um AOGCM, coincidente com a terceira fase do CMIP3, e que neste período não havia dados públicos disponíveis de escoamento diário para simular múltiplos AOGCMs.

Poucos estudos foram conduzidos para avaliar o impacto da elevação da temperatura sobre a inundação no planeta (ASADIEH & KRAKAUER, 2017; ROJAS *et al.*, 2013), e se destacam as publicações de estudos conduzidos em escala global dos autores Okazaki *et al.* (2012), Hirabayashi *et al.* (2013), Dankers *et al.* (2014), Arnell e Gosling (2016) e Tabari (2021). Nestas publicações os autores simularam combinações diferentes entre os cenários RCPs e vários modelos AOGCMs, e foi observada uma tendência para o aumento na intensidade esperada para as inundações fluviais na América do Sul e nas regiões sul e sudeste da Ásia, com tendências de queda para a Europa e nos países mais ao sul da América do Sul.

Todavia, não há um consenso nestas previsões em grande escala, pois os autores Alfieri *et al.* (2017) avaliaram as projeções de inundação fluvial em escala global sob o cenário RCP8.5, e concluíram que no futuro com 4 °C de aquecimento terrestre haverá grande aumento no risco de inundações na Ásia, Europa e Estados Unidos, contrastando com as outras publicações citadas anteriormente que apontaram redução no perigo de inundações na Europa. A diferença pode ter sido motivada pela metodologia adotada, que fez *downscaling* de 7 GCMs produzidos pelo CMIP5, que resultou na alta resolução espacial de 0,35° para elaborar o mapeamento de áreas de risco.

Dentre os estudos de inundações considerando o aquecimento global em escala regional destacam-se as publicações de Brêda *et al.* (2023) sobre a América do Sul, Camilloni *et al.* (2013) sobre o sudeste da América do Sul, Donnelly *et al.* (2017) e Thober *et al.* (2018) sobre a Europa.

Cabe informar que nem sempre as projeções realizadas para a escala global coincidem com as obtidas para a escala regional, como o caso da América do Sul com tendências opostas nas diferentes escalas. Brêda *et al.* (2023) recentemente analisaram os impactos das mudanças climáticas em rios de grande porte da América do Sul por *downscaling* de 4 GCMs, RCP4.5 e RCP8.5 do CMIP5, e concluíram que 70% das grandes bacias hidrográficas analisadas apresentaram tendência de redução na inundação para o período futuro simulado (2021-2065), apesar de 50% das bacias apresentarem tendência de aumento na precipitação extrema. Esta condição foi associada à diminuição esperada para a umidade antecedente do solo na América do Sul, que se sobressai ao aumento da precipitação e reduz a intensidade da inundação.

Esse alerta sobre a importância da avaliação conjunta da tendência na umidade do solo também foi apontado por Tabari (2020) e Wasko *et al.* (2021), pois apesar da distribuição espacial e temporal da chuva serem os fatores determinantes para a ocorrência de inundações, as condições do relevo, da cobertura do solo, da umidade antecedente do solo e do padrão temporal do derretimento da neve também são processos relevantes na magnitude das cheias.

Também é válido destacar que a modelagem das projeções futuras de áreas sujeitas a inundação fluvial em grande escala não considera os efeitos de ações antrópicas para regularização de volumes d'água, como por exemplo a operação de reservatórios, canalização de rios, ou construção de barragens.

Estudos sobre o impacto do aquecimento global em mapeamento de inundações fluviais em escalas espaciais menores foram desenvolvidos para o sul da China (WANG *et al.*, 2023), leste da Índia (MAHATO *et al.*, 2022), centro-oeste dos Estados Unidos (XU *et al.*, 2017), Alemanha (HUANG *et al.*, 2013), Inglaterra (KAY & JONES, 2012) e Finlândia (VEIJALAINEN *et al.*, 2010).

No Quadro 1 são mostrados os artigos consultados sobre o mapeamento de inundações fluviais em ordem cronológica de publicação, com informações referentes à fase do CMIP, à quantidade de modelos climáticos simulados, aos cenários de concentrações de gases de efeito estufa adotados e à

região que foi avaliada. Vale destacar que nem sempre as publicações acompanharam a fase mais recente dos modelos climáticos globais que estava disponível.

Quadro 1 – Artigos consultados sobre inundação fluvial em contexto de mudanças climáticas

CMIP	GCM	RCM	Cenário de concentração de gases de efeito estufa	Região avaliada	Referência
3	4	4	Correspondente ao RCP4.5, RCP6.0 e RCP8.5	Finlândia	Veijalainen <i>et al.</i> (2010)
5	1	-	RCP4.5 e RCP8.5	Global	Okazaki <i>et al.</i> (2012)
3	1	3	Correspondente ao RCP6.0	Inglaterra	Kay e Jones (2012)
5	11	-	RCP2.6, RCP4.5, RCP6.0, RCP8.5	Global	Hirabayashi <i>et al.</i> (2013)
3	-	5	Correspondente ao RCP4.5, RCP6.0 e RCP8.5	Bacias dos rios Uruguai e Paraná	Camilloni <i>et al.</i> (2013)
3	1	3	Correspondente ao RCP4.5, RCP6.0 e RCP8.5	Alemanha	Huang <i>et al.</i> (2013)
5	5	-	RCP8.5	Global	Dankers <i>et al.</i> (2014)
3	21	-	Correspondente ao RCP4.5, RCP6.0 e RCP8.5	Global	Arnell e Gosling (2016)
5	7	-	RCP8.5	Global	Alfieri <i>et al.</i> (2017)
5	4	4	RCP2.6, RCP4.5 e RCP8.5	Europa	Donnelly <i>et al.</i> (2017)
5	1	2	RCP8.5	Bacia do rio Huron, nordeste EUA	Xu <i>et al.</i> (2017)
5	5	-	RCP2.6, RCP6.0 e RCP8.5	Europa	Thober <i>et al.</i> (2018)
5	4	-	RCP8.5	Global	Tabari (2021)
6	2	-	SSP2-4.5 e SSP5-8.5	Leste da Índia	Mahato <i>et al.</i> (2022)
5	4	-	RCP4.5 e RCP8.5	América do Sul	Brêda <i>et al.</i> (2023)
6	1	-	SSP1-2.6, SSP2-4.5 e SSP5-8.5	Sul da China	Wang <i>et al.</i> (2023)

Outra análise elaborada em estudos que avaliam o impacto das mudanças climáticas em inundações é feita sobre as alterações no tempo de retorno esperado para determinada vazão fluvial. Para tanto, séries de vazões diárias máximas anuais são simuladas para o período de referência e para

os cenários futuros de aquecimento global, e na sequência são ajustadas a alguma distribuição estatística.

Com o ajuste da série histórica simulada para o período do passado é definida a magnitude da vazão que corresponde a determinado tempo de recorrência, e então esta magnitude é buscada na série simulada para o período futuro. Através deste procedimento é avaliado se houve queda ou ascensão no tempo de retorno que está associado a uma vazão de referência.

Determinada vazão esperada para um evento com 100 anos de recorrência no período pré-industrial deve ocorrer a cada 10-50 anos em diversos rios principais do sul e sudeste asiático, Oceania e África, devido ao aumento de 10~30% na magnitude da vazão esperada para o futuro, considerando o cenário RCP8.5 simulado por 11 AOGCMs do CMIP5 (HIRABAYASHI *et al.*, 2013).

Arnell e Gosling (2016) utilizaram 21 modelos climáticos do CMIP3 e quatro cenários de emissões de gases do efeito estufa para realizar projeções globais acerca do tempo de recorrência, e observaram que com o modelo climático HadCM3 a magnitude de uma inundação atualmente esperada com 100 anos de recorrência deverá ocorrer com uma frequência duas vezes maior para 40% do planeta em 2050, considerando um cenário de emissão equivalente ao RCP6.0.

Ainda na escala global, para Dankers *et al.* (2014) a vazão atualmente esperada com 30 anos de recorrência deve se tornar menos frequente em 30% do planeta com o aumento do período de recorrência para 40 anos, enquanto o restante das regiões deve apresentar aumento na frequência de inundações fluviais com reduções nos tempos de retorno para 20 anos em 40-60% da área, e 10 anos de tempo de retorno para 20-45% do planeta. Neste estudo foram utilizados 5 GCMs do CMIP5 para o cenário RCP8.5.

Embora tenham acontecido avanços nas pesquisas que avaliam o risco de inundações sob os efeitos do aquecimento global, ainda existem muitas incertezas envolvidas nas projeções climáticas e suas diferentes escalas (MOURA *et al.*, 2018) para serem incorporadas de uma forma prática na avaliação de riscos de projetos e obras de engenharia sujeitos à eventos extremos, especialmente devido às alterações esperadas no período de retorno. Neste sentido, recomenda-se a leitura do guia para incorporar as mudanças climáticas na avaliação de inundação dos autores Wasko *et al.* (2021b).

CONCLUSÃO

Grande interesse científico tem sido direcionado à avaliação dos impactos que o aumento da temperatura superficial do planeta pode provocar no futuro, com especial atenção ao ciclo hidrológico e sua intensificação. Com o aumento da temperatura a atmosfera tem maior capacidade de retenção de umidade, por isso os eventos de precipitação extrema devem se tornar mais intensos e frequentes.

Por causa dessa avaliação, muitos estudos sugeriram uma relação de causa-efeito verdadeira entre aumento de eventos de precipitação extrema com aumento na incidência de inundações fluviais, sem considerar os outros fenômenos físicos envolvidos no processo. Os avanços computacionais recentes dos modelos climáticos globais permitem incorporar cada vez mais variáveis físicas nas projeções futuras do clima, melhorando a qualidade das simulações e diminuindo as incertezas dos resultados fornecidos.

Com a elevação da temperatura, diversas regiões do planeta podem apresentar crescimento na evaporação, reduzindo a umidade antecedente do solo e, conseqüentemente, diminuindo a intensidade de inundações fluviais. Outros fatores regionais como mudanças na ocupação do solo e no período de derretimento de neve também são responsáveis por alterar a magnitude de inundações.

São muitos os fatores que influenciam os resultados de projeções de inundações fluviais no contexto de mudanças climáticas: desde o(s) modelo(s) climático(s) global, método de redução de escala, cenário representativo de gases de efeito estufa, resolução espacial da simulação, distribuição

estatística para análise de extremos, até o modelo hidrológico adotado para avaliação do comportamento do escoamento na bacia hidrográfica.

Devido às grandes incertezas associadas, é importante que mais estudos sejam conduzidos neste contexto, especialmente ao considerar que as avaliações de riscos de obras de engenharia e vulnerabilidade de áreas ocupadas por populares são rotineiramente conduzidas com a métrica do tempo de recorrência esperado para determinado evento extremo.

REFERÊNCIAS

ALFIERI, L.; BISSELINK, B.; DOTTORI, F.; NAUMANN, G.; ROO, A. D.; SALAMON, P.; WYSER, K.; FEYEN, L. (2017). “Global projections of river flood risk in a warmer world”. *Earth’s Future*, v. 5, n. 2, p. 171–182. doi:10.1002/2016EF000485

ARNELL, N. W.; GOSLING, S. N. (2016). “The impacts of climate change on river flood risk at the global scale”. *Climatic Change*, v. 134, n. 3, p. 387–401. doi:10.1007/s10584-014-1084-5

ASADIEH, B.; KRAKAUER, N. Y. (2017). “Global change in streamflow extremes under climate change over the 21st century”. *Hydrology and Earth System Sciences*, v. 21, n. 11, p. 5863–5874. doi:10.5194/hess-21-5863-2017

BRÊDA, J. P. L. F.; 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*, v. 619. doi:10.1016/j.jhydrol.2023.129284

CAMILLONI, I. A.; SAURRAL, R. I.; MONTROULL, N. B. (2013). “Hydrological projections of fluvial floods in the Uruguay and Paraná basins under different climate change scenarios”. *International Journal of River Basin Management*, v. 11, n. 4, p. 389–399. doi:10.1080/15715124.2013.819006

CHOU, S. C.; LYRA, A.; MOURÃO, C.; DEREZYNSKI, C.; PILOTTO, I.; GOMES, J.; BUSTAMANTE, J.; TAVARES, P.; SILVA, A.; RODRIGUES, D.; CAMPOS, D.; CHAGAS, D.; SUEIRO, G.; SIQUEIRA, G.; NOBRE, P.; MARENGO, J. (2014). “Evaluation of the Eta Simulations Nested in Three Global Climate Models”. *American Journal of Climate Change*, v. 03, n. 05, p. 438–454. doi:10.4236/ajcc.2014.35039

DANKERS, R.; ARNELL, N. W.; CLARK, D. B.; FALLOON, P. D.; FEKETE, B. M.; GOSLING, S. N.; HEINKE, J.; KIM, H.; MASAKI, Y.; SATOH, Y.; STACKE, T.; WADA, Y.; WISSER, D. (2014). “First look at changes in flood hazard in the Inter-Sectoral Impact Model Intercomparison Project ensemble”. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, v. 111, n. 9, p. 3257–3261. doi:10.1073/pnas.1302078110

DONNELLY, C.; GREUILL, W.; ANDERSSON, J.; GERTEN, D.; PISACANE, G.; ROUDIER, P.; LUDWIG, F. (2017). “Impacts of climate change on European hydrology at 1.5, 2 and 3 degrees mean global warming above preindustrial level”. *Climatic Change*, v. 143, n. 1–2, p. 13–26. doi:10.1007/s10584-017-1971-7

DOTTORI, F.; SZEWCZYK, W.; CISCAR, J. C.; ZHAO, F.; ALFIERI, L.; HIRABAYASHI, Y.; BIANCHI, A.; MONGELLI, I.; FRIELER, K.; BETTS, R. A.; FEYEN, L. (2018). “Increased human and economic losses from river flooding with anthropogenic warming”. *Nature Climate Change*, v. 8, n. 9, p. 781–786. doi:10.1038/s41558-018-0257-z

GUAN, X.; VOROGUSHYN, S.; APEL, H.; MERZ, B. (2023). “Assessing compound pluvial-fluvial flooding: Research status and ways forward”. *Water Security*, v. 19, p. 100136. doi:10.1016/j.wasec.2023.100136

HIRABAYASHI, Y.; MAHENDRAN, R.; KOIRALA, S.; KONOSHIMA, L.; YAMAZAKI, D.; WATANABE, S.; KIM, H.; KANAE, S. (2013). “Global flood risk under climate change”. *Nature Climate Change*, v. 3, n. 9, p. 816–821. doi: 10.1038/nclimate1911

HUANG, S.; HATTERMANN, F. F.; KRYSANOVA, V.; BRONSTERT, A. (2013). “Projections of climate change impacts on river flood conditions in Germany by combining three different RCMs with a regional eco-hydrological model”. *Climatic Change*, v. 116, n. 3–4, p. 631–663. doi: 10.1007/s10584-012-0586-2

IPCC. (2012). “Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation.” A Special Report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, USA. p. 582.

IPCC. (2021). “Climate Change 2021: The Physical Science Basis.” Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, USA. p. 2391. doi:10.1017/9781009157896.

IPCC. (2022). “Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability.” Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, USA. p. 3056. doi:10.1017/9781009325844

JONGMAN, B.; WARD, P. J.; AERTS, J. C. J. H. (2012). “Global exposure to river and coastal flooding: Long term trends and changes”. *Global Environmental Change*, v. 22, n. 4, p. 823–835. doi:10.1016/j.gloenvcha.2012.07.004

KAY, A. L.; JONES, D. A. (2012). “Transient changes in flood frequency and timing in Britain under potential projections of climate change”. *International Journal of Climatology*, v. 32, n. 4, p. 489–502. doi: 10.1002/joc.2288

KHARIN, V. V.; ZWIERS, F. W.; ZHANG, X.; WEHNER, M. (2013). “Changes in temperature and precipitation extremes in the CMIP5 ensemble”. *Climatic Change*, v. 119, n. 2, p. 345–357. doi:10.1007/s10584-013-0705-8

LIMA, J. W. M. (2014). *Efeitos das mudanças climáticas na geração de energia elétrica*. AES Tietê São Paulo – SP, 360 p.

MAHATO, P. K.; SINGH, D.; BHARATI, B.; GAGNON, A. S.; SINGH, B. B.; BREMA, J. (2022). “Assessing the impacts of human interventions and climate change on fluvial flooding using CMIP6 data and GIS-based hydrologic and hydraulic models”. *Geocarto International*, v. 37, n. 26, p. 11483–11508. doi:10.1080/10106049.2022.2060311

MARENGO, J. A. (2014). “O futuro clima do Brasil”. *Revista USP*, n. 103, p. 25.

MOSS, R. H.; EDMONDS, J. A.; HIBBARD, K. A.; MANNING, M. R.; ROSE, S. K.; VAN VUUREN, D. P.; CARTER, T. R.; EMORI, S.; KAINUMA, M.; KRAM, T.; MEEHL, G. A.; MITCHELL, J. F.; NAKICENOVIC, N.; RIAHI, K.; SMITH, S. J.; STOUFFER, R. J.; THOMSON, A. M.; WEYANT, J. P.; WILBANKS, T. J. (2010). “The next generation of scenarios for climate change research and assessment”. *Nature*, v. 463, n. 7282, p. 747–756. doi:10.1038/nature08823

MOURA, C. N.; MINE, M. R. M.; KAVISKI, E. (2018). “Incertezas e impactos de mudanças climáticas nos recursos hídricos” in *Anais do XXVIII Congresso Latinoamericano de Hidráulica-Hidrologia Superficial e Subterrânea*, p. 1402–1413.

OKAZAKI, A.; YEH, P. J. F.; YOSHIMURA, K.; WATANABE, M.; KIMOTO, M.; OKI, T. (2012). “Changes in flood risk under global warming estimated using MIROC5 and the discharge probability index”. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, v. 90, n. 4, p. 509–524. doi:

10.2151/jmsj.2012-405

RAZAVI, S.; GOBER, P.; MAIER, H. R.; BROUWER, R.; WHEATER, H. (2020). “*Anthropocene flooding: Challenges for science and society*”. *Hydrological Processes*, v. 34, n. 8, p. 1996–2000. doi: 10.1002/hyp.13723

ROJAS, R.; FEYEN, L.; WATKISS, P. (2013). “*Climate change and river floods in the European Union: Socio-economic consequences and the costs and benefits of adaptation*”. *Global Environmental Change*, v. 23, n. 6, p. 1737–1751. doi:10.1016/j.gloenvcha.2013.08.006

SUN, Q.; ZHANG, X.; ZWIERS, F.; WESTRA, S.; ALEXANDER, L. V. (2021). “*A global, continental, and regional analysis of changes in extreme precipitation*”. *Journal of Climate*, v. 34, n. 1, p. 243–258. doi: 10.1175/jcli-d-19-0892.1

TABARI, H. (2020). “*Climate change impact on flood and extreme precipitation increases with water availability*”. *Scientific Reports*, v. 10, n. 1. doi:10.1038/s41598-020-70816-2

TABARI, H. (2021). “*Extreme value analysis dilemma for climate change impact assessment on global flood and extreme precipitation*”. *Journal of Hydrology*, v. 593. doi: 10.1016/j.jhydrol.2020.125932

TEBALDI, C. *et al.* (2021). “*Climate model projections from the Scenario Model Intercomparison Project (ScenarioMIP) of CMIP6*”. *Earth System Dynamics*, v. 12, n. 1, p. 253–293. doi:10.5194/esd-12-253-2021

THOBER, S.; KUMAR, R.; WANDERS, N.; MARX, A.; PAN, M.; RAKOVEC, O.; SAMANIEGO, L.; SHEFFIELD, J.; WOOD, E. F.; ZINK, M. (2018). “*Multi-model ensemble projections of European river floods and high flows at 1.5, 2, and 3 degrees global warming*”. *Environmental Research Letters*, v. 13, n. 1. doi:10.1088/1748-9326/aa9e35

TRENBERTH, K. E. (2011). “*Changes in precipitation with climate change*”. *Climate Research*, v. 47, n. 1–2, p. 123–138. doi: 10.3354/cr00953

VEIJALAINEN, N.; LOTSARI, E.; ALHO, P.; VEHVILÄINEN, B.; KÄYHKÖ, J. (2010). “*National scale assessment of climate change impacts on flooding in Finland*”. *Journal of Hydrology*, v. 391, n. 3–4, p. 333–350. doi:10.1016/j.jhydrol.2010.07.035

WANG, M.; FU, X.; ZHANG, D.; CHEN, F.; LIU, M.; ZHOU, S.; SU, J.; TAN, S. K. (2023). “*Assessing urban flooding risk in response to climate change and urbanization based on shared socio-economic pathways*”. *Science of the Total Environment*, v. 880, p. 163470. doi: 10.1016/j.scitotenv.2023.163470

WASKO, C.; NATHAN, R.; STEIN, L.; O’SHEA, D. (2021). “*Evidence of shorter more extreme rainfalls and increased flood variability under climate change*”. *Journal of Hydrology*, v. 603. doi:10.1016/j.jhydrol.2021.126994

WASKO, C.; WESTRA, S.; NATHAN, R.; ORR, H. G.; VILLARINI, G.; VILLALOBOS HERRERA, R.; FOWLER, H. J. (2021b). “*Incorporating climate change in flood estimation guidance*”. *Phil. Trans. R. Soc. A*. 379. doi:10.1098/rsta.2019.0548

XAVIER, A. C. F.; RUDKE, A. P.; FUJITA, T.; BLAIN, G. C.; MORAIS, M. V. B. DE; ALMEIDA, D. S. DE; RAFEE, S. A. A.; MARTINS, L. D.; SOUZA, R. A. F. DE; FREITAS, E. D. DE; MARTINS, J. A. (2020). “*Stationary and non-stationary detection of extreme precipitation events and trends of average precipitation from 1980 to 2010 in the Paraná River basin, Brazil*”. *International Journal of Climatology*, v. 40, n. 2, p. 1197–1212. doi:10.1002/joc.6265

XU, X.; WANG, Y. C.; KALCIC, M.; MUENICH, R. L.; YANG, Y. C. E.; SCAVIA, D. (2017). “*Evaluating the impact of climate change on fluvial flood risk in a mixed-use watershed*”. *Environmental Modelling and Software*, v. 122. doi:10.1016/j.envsoft.2017.07.013

**3 VAZÃO DE PROJETO DE USINAS HIDRELÉTRICAS NO BRASIL EM
CONTEXTO DE NÃO ESTACIONARIEDADE – ARTIGO 2**

Vazão de Projeto de Usinas Hidrelétricas no Brasil em Contexto de Não Estacionariedade

Laís Mariana Wosniack^a, Daniel Henrique Marco Detzel^a

^aPrograma de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental, Departamento de Hidráulica e Saneamento, Universidade Federal do Paraná

Resumo: A premissa da estacionariedade de séries de vazões máximas anuais afluentes a 152 usinas hidrelétricas (UHEs) do Sistema Interligado Nacional (SIN) brasileiro foi confrontada através do teste de Mann Kendall, na variante *trend-free prewhitening*, e foram identificados indícios de não estacionariedade em 70 afluências de UHEs. Com o teste de Pettitt, verificou-se que a década de 90 foi o período que mais concentrou mudanças abruptas nos regimes de máximos fluviais. O método *Empirical Quantile Mapping* é proposto como modelo de correção da não estacionariedade em séries hidrológicas, e é comparado ao método da curva acumulativa de vazões e a alternativa de truncamento da série histórica contida no período após a quebra. A análise de frequência de extremos é realizada com o ajuste da distribuição generalizada de valores extremos (GEV), com parâmetros estimados pelo método da máxima verossimilhança, para determinar as vazões decamilenares das UHEs. As condições de segurança hidrológica das UHEs frente às vazões decamilenares determinadas em contexto não estacionário são avaliadas e dentre os grandes vertedouros brasileiros que foram dimensionados com base na cheia decamilenar, existe possibilidade de subdimensionamento dos dispositivos extravasores das UHEs Barra Bonita, Capivara, Itaúba, Moxotó, P. Afonso, Salto Caxias, Salto Osório, Salto Santiago e Xingó.

Abstract: Assumption of stationarity in series of maximum annual daily streamflow to 152 hydropower plants (HPPs) in the Brazilian National Interconnected System (SIN) was assessed using the Mann Kendall test, in the trend-free prewhitening form and signs of non-stationarity were detected in 70 HPPs streamflow. Through the Pettitt test, it was revealed that the 1990s was the period with the greatest concentration of abrupt changes in the maximum streamflow. The Empirical Quantile Mapping method is proposed as a model for correcting non-stationarity in hydrological series and it is compared to the cumulative flow curve method and the alternative of truncating the historical series contained in the post-break period. Frequency analysis of extremes is carried out by adjusting the generalized extreme value (GEV) distribution, using the maximum likelihood method to determine the 10,000-year flow rates of the HPPs. Hydrological safety conditions of HPPs are evaluated based on 10,000-year flow rates established in a non-stationary context and among the largest Brazilian spillways that have been designed based on the 10,000-year flood, there is a possibility that the spillway devices at the Barra Bonita, Capivara, Itaúba, Moxotó, P. Afonso, Salto Caxias, Salto Osório, Salto Santiago and Xingó HPPs may be undersized.

Palavras-Chave: vazão de projeto; não estacionariedade; análise de frequência; *Empirical Quantile Mapping*

INTRODUÇÃO

As usinas hidrelétricas (UHEs) são a principal fonte de geração de energia elétrica no Brasil, representando 50,16% da matriz energética nacional em 2023 (ONS, 2024). De acordo com a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL, 2024), existem 214 UHEs em operação no país, com 103 GW de potência fiscalizada. Deste total, 152 usinas são coordenadas e controladas pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), das quais 62 possuem reservatório de regularização, e 90 operam a fio de água (ONS, 2024).

O dimensionamento dos órgãos extravasores de barragens no Brasil é orientado por manuais e diretrizes que correlacionam o porte da estrutura e o risco potencial associado em caso de colapso com determinada probabilidade ínfima de ocorrência de sinistro. Para barragens com mais de 30 metros de altura, ou com população residente na área a jusante da estrutura, Eletrobrás (2003) e ANA (2016) recomendam a adoção da cheia máxima provável (CMP) como referência para a definição da vazão de projeto. Considerando a complexidade envolvida na determinação da CMP, com a possível falta de dados disponíveis para estimar a precipitação máxima provável (PMP) no local de interesse, pode-se adotar a vazão associada ao tempo de recorrência de 10.000 anos para definição da cheia de projeto de vertedores (ELETROBRÁS, 1987; ANA, 2016).

O processo tradicionalmente adotado para estimar a magnitude de uma cheia decamilenar é feito através da análise de frequência dos eventos extremos que foram registrados ao longo de determinada série histórica. Em se tratando de uma análise estatística sobre o conjunto de observações de determinada variável hidrológica, existem pré-requisitos para sua aplicação com esta finalidade, quais sejam as hipóteses de homogeneidade, aleatoriedade, independência e estacionariedade (NAGHETTINI; PINTO, 2007). A homogeneidade refere-se aos dados serem extraídos de uma mesma população, a aleatoriedade significa que as flutuações identificadas na variável decorrem de fenômenos naturais e a independência, como o nome sugere, implica que as observações presentes na amostra não influenciam a observação seguinte.

Uma amostra obtida a partir da seleção dos valores extremos anuais pode ter sua independência violada se a região espacial na qual a variável hidrológica está inserida apresentar padrões de estiagem e deflúvio em descompasso com o ano civil.

Isto é, um evento meteorológico excepcionalmente extremo iniciado no mês de dezembro de determinado ano, pode se estender para o ano seguinte, e popular a amostra de extremos anuais em duas ocorrências seguidas (MELCHIOR, 2022). Como forma de evitar este cenário, Naghettini e Pinto (2007) recomenda considerar o ano hidrológico da região na análise de vazões máximas anuais.

Com relação ao princípio da estacionariedade, as séries temporais hidrológicas apresentam *comportamento* estacionário se os seus momentos estatísticos, como a média e a variância, independem do tempo. Embora Detzel (2015) destaque a incoerência conceitual em classificar uma série como “estacionária” ou “não estacionária”, pois o termo “estacionário” está restrito a modelos e processos estocásticos, o mesmo autor aponta que essa discussão tem maior cunho filosófico do que matemático, dado que o termo “estacionariedade” está, a rigor, atrelado a modelos ou processos estocásticos. Assim sendo, por simplificação, neste trabalho foi adotado este termo para as séries temporais, acompanhando as demais literaturas existentes sobre o tema, como Detzel *et al.* (2011), Alves *et al.* (2013), Bartiko *et al.* (2017), Chagas e Chaffe (2019) e Souza e Reis (2022).

A premissa da estacionariedade em processos hidrológicos é objeto de debate (MILLY *et al.*, 2008; SERAGO; VOGEL, 2018; ANZOLIN *et al.*, 2024) em decorrência dos efeitos das mudanças climáticas sobre o ciclo hidrológico, que é intensificado através da maior troca de água entre a atmosfera e a superfície terrestre (IPCC, 2022). A elevação da temperatura aumenta a oferta de vapor de água disponível na atmosfera para ser precipitado, além de aumentar a evaporação e a evapotranspiração (TRENBERTH, 2011).

Com as alterações nos padrões de circulação de água na atmosfera, as precipitações se tornam mais voláteis, e aumentam a frequência e a intensidade dos eventos climáticos extremos (IPCC, 2021). Não obstante, as alterações no uso e cobertura do solo, as práticas agrícolas e as ações antrópicas de gerenciamento dos recursos hídricos promovem alterações no deflúvio de bacias hidrográficas (VILLARINI *et al.*, 2011; SOUZA; REIS, 2022).

Assim sendo, a abordagem tradicionalmente aplicada em análises de frequência de eventos extremos fundamentadas em técnicas estatísticas que pressupõem a estacionariedade pode não ser apropriada (OBEYSEKERA; SALAS, 2014; BARTIKO *et al.*, 2017; SERAGO; VOGEL, 2018, FRANÇOIS *et al.*, 2019). Apesar dos esforços empregados no desenvolvimento de modelos não estacionários

que possibilitam a variação no tempo da média, variância e forma de uma distribuição probabilística de extremos, não existe consenso sobre o método para realizar análises de frequência nesse contexto e há controvérsias se estes modelos podem ser utilizados para previsão de cheias (ANZOLIN *et al.*, 2024).

Vale ressaltar que as previsões climáticas, que incluem dentre outros os prognósticos da temperatura, umidade, velocidade do vento e precipitação, são provenientes de modelos numéricos que visam representar a dinâmica da atmosfera e as interações entre os diversos componentes do sistema físico climático. É evidente a complexidade desses modelos e o alto custo computacional envolvido para simular o comportamento de um grande conjunto de variáveis físicas no tempo (LIMA, 2014).

Em grande parte, o questionamento da aplicabilidade de modelos não estacionários reside no aumento da incerteza sobre análises de frequência que utilizam maior número de parâmetros estimados, o possível uso equivocado de covariáveis temporais ou físicas (MELCHIOR, 2022; ANZOLIN *et al.*, 2024), e dificuldades para identificar se a tendência observada pode estar associada a fenômenos naturais persistentes (LINS; COHN, 2011). É importante destacar que ainda que a premissa da estacionariedade seja plausível, existem incertezas na determinação de vazões com grande recorrência associadas a possíveis inconsistências na série amostral, bem como pelo ajuste de séries de pequena extensão temporal com alguma distribuição de probabilidade (FRANÇOIS *et al.*, 2019).

Considerando a problemática envolvida no dimensionamento tradicional das estruturas hidráulicas sob premissas estacionárias, torna-se pertinente investigar a presença de tendência temporal nas séries afluentes desses barramentos, e avaliar os efeitos dessa tendência sobre vazões de grande recorrência. Diante dessa perspectiva, neste trabalho foram analisadas as séries históricas afluentes das UHEs que compõem o SIN, com período total de observação variável, mas compreendido entre 1931 e 2022. Os objetivos são: (i) identificar as usinas com afluições máximas anuais com indícios de tendência temporal; (ii) detectar o ano de mudança abrupta na série histórica; (iii) comparar dois métodos de correção da não estacionariedade, além de realizar o truncamento da série histórica no período contido após o ano de quebra; (iv) determinar as vazões de projeto das usinas para as séries históricas não estacionárias e as séries com a estacionariedade corrigida; (v) identificar as usinas

em condições alarmantes (conservadoras) em relação a tendência de aumento (diminuição) das vazões de projeto em contexto não estacionário.

MATERIAIS E MÉTODOS

Esta seção apresenta as etapas metodológicas do presente estudo para obter as vazões de projeto das UHEs controladas pelo ONS em contexto não estacionário. Na Figura 1 é mostrado o esquema geral adotado, e nos itens subsequentes são detalhados os métodos aplicados para identificar as usinas com indícios de tendências temporais em suas respectivas afluições e o ano em que essa mudança abrupta ocorreu. Na sequência, são apresentados dois métodos de correção da não estacionariedade, o processo de ajuste das séries hidrológicas com a distribuição de máximos GEV e a ferramenta utilizada para comparar as diferentes vazões de projeto determinadas para cada usina.

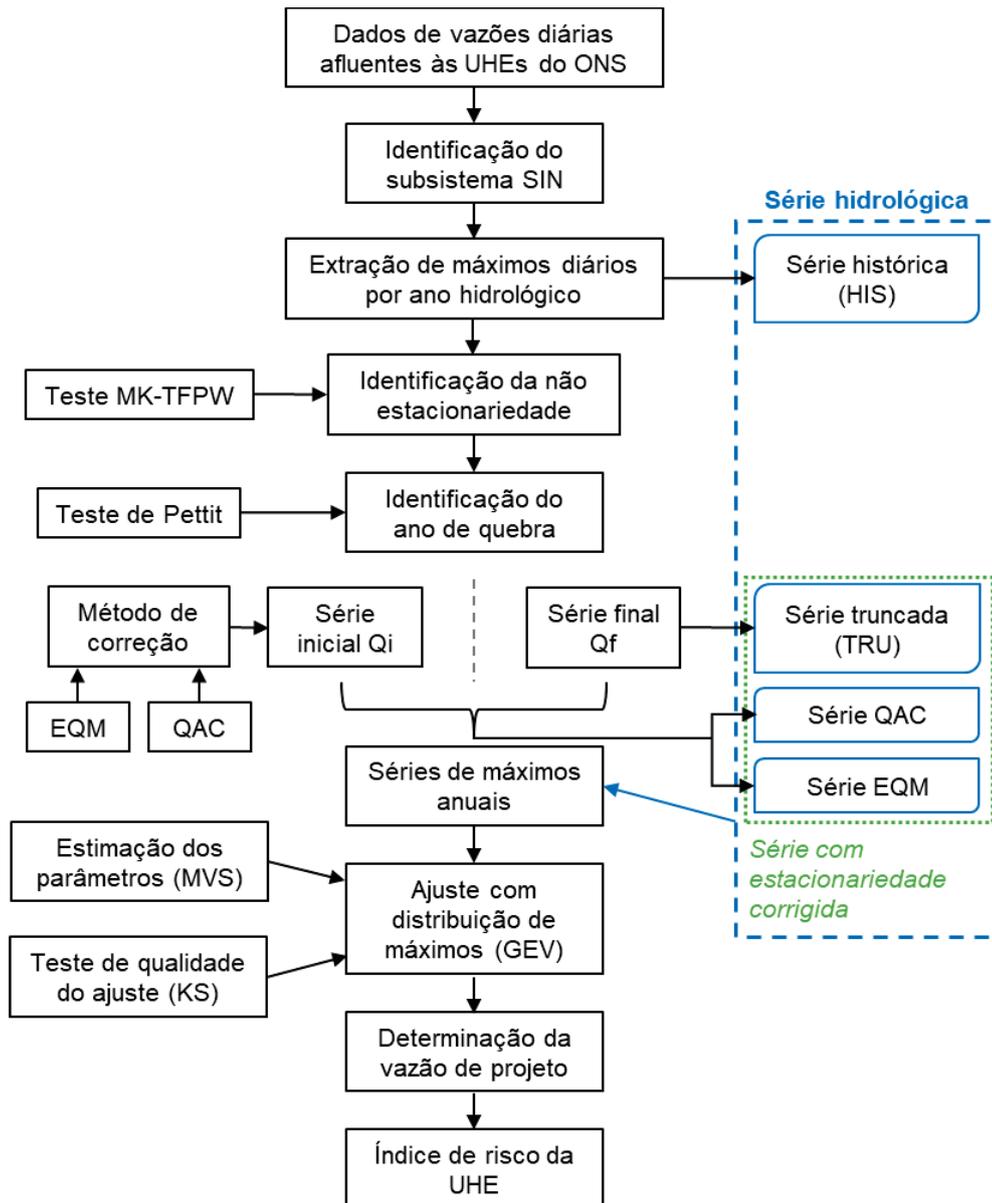


Figura 1 - Fluxograma metodológico.

Coleta de Dados

As séries históricas das vazões médias diárias afluentes às usinas hidrelétricas nacionais foram obtidas diretamente do ONS, compreendendo registros de 160 usinas com período de observação total variável, mas contido entre 1931 e 2022. Em se tratando de dados oriundos do ONS, os valores são consistentes, dispensando a necessidade de análise de falhas.

Destaca-se que tais registros são de vazões naturalizadas que, por definição do próprio ONS (2011), correspondem às vazões que ocorreriam em determinada

seção do rio caso não houvesse ações antrópicas na sua bacia contribuinte, quais sejam captações de água, regularização de reservatórios ou transposições de vazões para diversas finalidades.

Do total de postos do ONS, foram removidas as séries de dados históricos em duplicidade, onde há mais de um aproveitamento hidrelétrico no mesmo local do curso de água. Da mesma forma, casos identificados como área incremental entre reservatórios de grande porte, também foram removidos.

Na sequência, foi identificado em qual subsistema do SIN cada série afluente faz parte: Sul, Sudeste/Centro-Oeste, Nordeste ou Norte. Melchior (2022) definiu os anos hidrológicos por subsistema do SIN, sendo de fevereiro a janeiro – Sul, agosto a julho – Sudeste/Centro-Oeste, setembro a agosto – Nordeste e novembro a outubro – Norte. Com base nessa definição, foram extraídas as séries de vazões diárias máximas anuais por ano hidrológico.

A localização das UHEs selecionadas para o presente estudo é apresentada na Figura 2, em que são mostrados os subsistemas SIN e a extensão temporal de cada série afluente por escala de cores. Ao Norte do país, abrangendo o subsistema Norte e parte do Sudeste/Centro-Oeste estão situadas as séries com menor extensão temporal, mas que possuem ao menos 34 anos de observações diárias. Nas regiões Sul, Sudeste e Nordeste estão concentradas as séries afluentes com maior quantidade de registros, das quais 30% possuem 91 anos de dados.

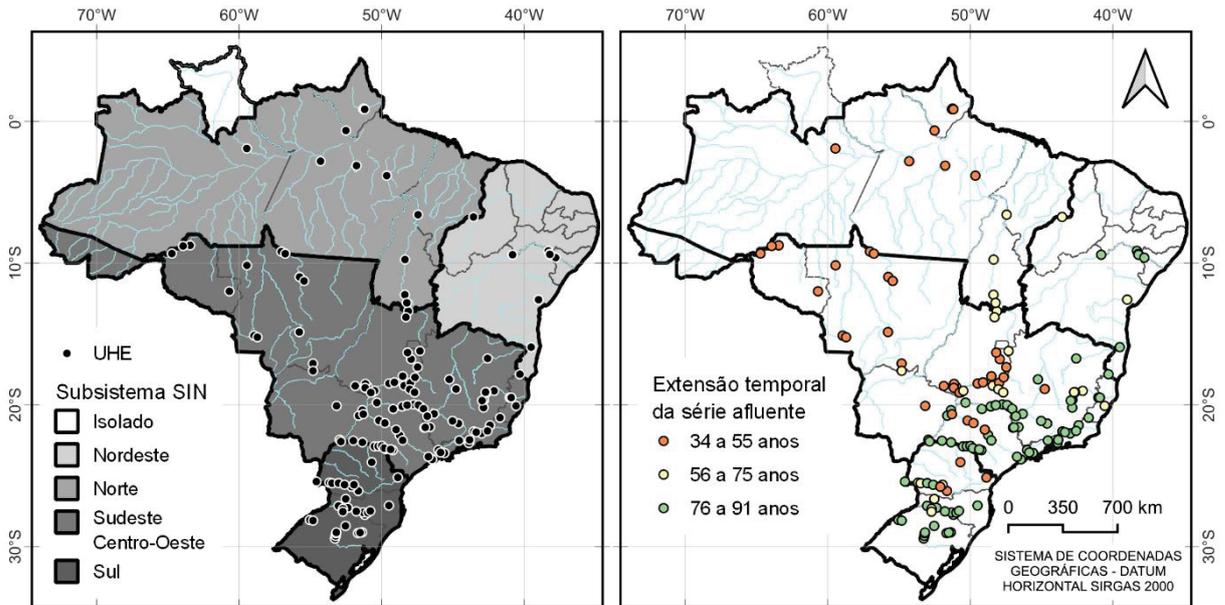


Figura 2 – Localização das usinas hidrelétricas selecionadas e subsistemas SIN. Extensão temporal das séries afluentes: círculos laranjas indicam séries com 34 a 55 anos, círculos amarelos indicam séries com 56 a 75 anos e círculos verdes indicam séries com 76 a 91 anos.

Em relação às grandes bacias hidrográficas do Brasil, os empreendimentos hidrelétricos geridos pelo ONS estão concentrados nos rios Grande, Iguaçu, Paranapanema, São Francisco e Tocantins, nos quais estão instaladas 28% das usinas que compõem o SIN, com destaque para o rio Grande, situado no subsistema Sudeste/Centro-Oeste, com 11 UHEs instaladas, o que representa 7% do total instalado. As informações básicas acerca das usinas selecionadas para o presente estudo são apresentados no Apêndice 1.

Análise de Tendência

Tendências em séries hidrológicas podem ser identificadas através de testes de hipóteses, nos quais suposições acerca das amostras são criadas e confrontadas por meio de ferramentas estatísticas. Neste contexto, a hipótese testada foi a de que a série não apresenta tendência temporal, ao nível de significância (α) de 5% para rejeição da hipótese nula.

Uma forma de classificar os diferentes testes de hipóteses existentes é em relação ao conhecimento da distribuição de probabilidades da população da qual os dados amostrais foram extraídos, em que são ditos paramétricos se a distribuição for conhecida, ou não paramétricos em caso contrário.

Apesar dos testes não paramétricos serem menos poderosos, como os dados analisados não são condicionados por qualquer distribuição probabilística, os mesmos se tornam mais flexíveis, e têm sido amplamente utilizados no âmbito da hidrologia (DETZEL, 2015; ULIANA *et al.*, 2015).

O teste não paramétrico de Mann Kendall, na variante *Trend-Free Prewhitening* (MK-TFPW), proposto por Yue e Wang (2002), foi aplicado para detectar a presença de tendência nas séries analisadas. Este método inicialmente remove a tendência da série, depois remove os efeitos da correlação entre os dados no processo chamado de *prewhitening*, e devolve a tendência à série antes de aplicar o teste de Mann-Kendall. Tal procedimento sobre o teste original de Mann-Kendall justifica-se para contornar a influência da autocorrelação positiva (negativa) entre os dados da série e o aumento (diminuição) da possibilidade de rejeição da hipótese nula quando a mesma for verdadeira.

Para identificar os pontos de mudanças abruptas nas séries históricas que apresentaram indícios de não estacionariedade, foi aplicado o teste não paramétrico de Pettitt, com a hipótese nula de que duas subamostras pertencem a uma mesma população, ao nível de significância (α) de 5% para sua rejeição. Para mais detalhes sobre a formulação estatística do teste de Pettitt, bem como identificar mais exemplos da aplicação conjunta dos testes MK-TFPW e Pettitt para analisar tendências em séries hidrológicas, recomenda-se consultar Gao *et al.* (2022).

Métodos de Correção da Não Estacionariedade

Dois métodos de correção da não estacionariedade foram avaliados no presente estudo: o método *Empirical Quantile Mapping* (EQM) e o método da curva acumulativa de vazões (QAC). Destaca-se que o uso do método EQM no contexto da remoção de tendências é uma proposta do presente trabalho, pois não foram encontrados trabalhos anteriores que o utilizaram para este fim. Além disso, uma alternativa de truncamento da série histórica no período com tendência temporal também foi produzida.

Método Empirical Quantile Mapping (EQM)

O método EQM foi desenvolvido para a correção de viés em cenários de mudanças climáticas, e seu uso tem se popularizado nesse contexto (HOLTHUIJZEN *et al.*, 2022), com ressalvas à sensibilidade do modelo com o período de calibração selecionado.

Sendo Q_i a série que se deseja corrigir o viés, e Q_f a série calibrada, o procedimento de cálculo se baseia em estimar os quantis empíricos das subamostras analisadas, por meio das funções acumuladas de probabilidade $F_i(Q_i)$ e $F_f(Q_f)$. A correção do viés na subamostra Q_i é feita através da função inversa $F_f^{-1}[F_i(Q_i)]$. Para este trabalho, as séries com tendência foram divididas em duas subamostras com base no resultado do teste de Pettitt. Assim, as subamostras Q_i e Q_f se referem a séries dos períodos mais antigos e recentes, respectivamente.

A aplicação do método é exemplificada na Figura 3, através dos diagramas de frequências relativas acumuladas da UHE Itaipu considerando as vazões máximas anuais observadas (linha azul) e as vazões máximas anuais corrigidas pelo método EQM (linha laranja), com destaque para o crescimento da mediana da série de 22.567 m³/s para 26.243 m³/s após a correção da não estacionariedade.

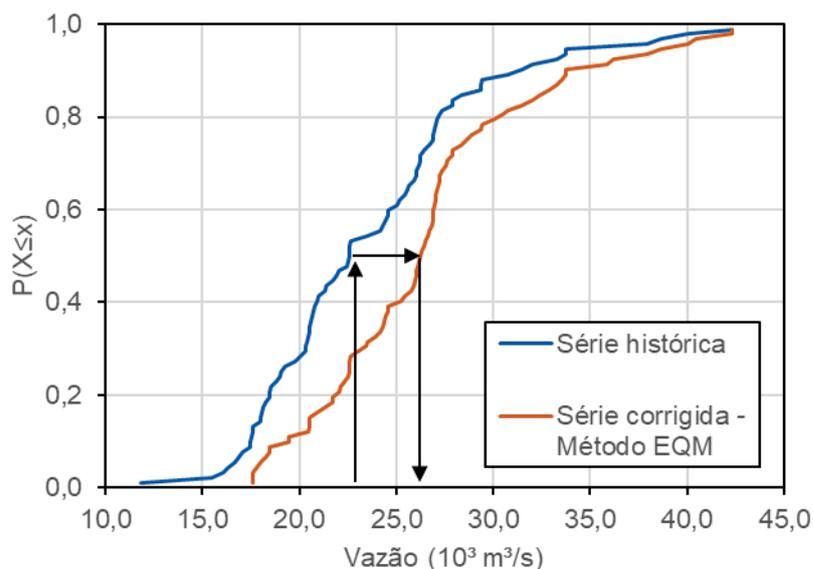


Figura 3 - Aplicação do método EQM – Diagramas de frequências relativas acumuladas da UHE Itaipu para a série histórica e a série corrigida.

Método da Curva Acumulativa de Vazões (QAC)

O método QAC é uma forma expedita de correção da não estacionariedade e, conforme Detzel *et al.* (2011), se baseia no princípio de que a curva acumulativa de vazões de determinada série histórica em condições estacionárias poderá ser ajustada com uma única linha de tendência contínua para todo o período. Do contrário, sob contexto não estacionário, é verificada uma mudança de declividade da curva acumulativa de vazões, o que leva ao ajuste de duas retas, uma para cada período.

Para linearizar a tendência, inicialmente são determinados os coeficientes angulares das retas obtidas para o período inicial (Q_i) e o período após a quebra (Q_f), e a razão entre Q_f/Q_i é utilizada para multiplicar a série de vazões acumuladas do período inicial.

Milléo *et al.* (2015) e Espinosa *et al.* (2017) utilizaram o método QAC para identificar a tendência temporal, enquanto Detzel *et al.* (2011) e Batista *et al.* (2009) aplicaram para correção da não estacionariedade.

Truncamento da Série Histórica

A série histórica contida no período após a quebra (Q_f) foi considerada como série de dados truncada, para posterior comparação com os métodos de correção de não estacionariedade. A extensão total da série truncada foi avaliada individualmente, e as UHEs que apresentaram ponto de quebra após o ano de 1991 foram removidas, mantendo apenas as séries truncadas com pelo menos 30 anos de dados.

Análise de Frequência

Com o intuito de reduzir as variáveis na comparação entre as vazões de projeto determinadas para as séries não estacionárias e após aplicar os métodos de correção da não estacionariedade, foi determinada uma única função densidade de probabilidade (FDP) para ser utilizada na análise de frequência de eventos extremos.

Para tanto, foram consideradas as distribuições mais aplicadas para a avaliação de máximos hidrológicos citadas por Melchior (2022), e foram testadas as seguintes FDPs: Gumbel, Log-Normal de 3 parâmetros (LN3) e Generalizada de

Valores Extremos (GEV). Através do resultado do teste de aderência de Kolmogorov-Smirnov (KS) com $\alpha = 5\%$, foi identificado que a distribuição GEV se ajustou ao maior número de séries de máximos e, portanto, foi utilizada para esta finalidade. O método da máxima verossimilhança (MLE - *Maximum Likelihood Estimates*) foi aplicado para a estimação dos parâmetros das distribuições. Destaca-se a utilização da distribuição GEV com parâmetros estimados por MLE em mais pesquisas envolvendo não estacionariedade de séries hidrológicas, como Isensee *et al.* (2021), Nashwan *et al.* (2019) Razmi *et al.* (2017), e Šraj *et al.* (2016).

Assim como os demais testes estatísticos previamente aplicados, o teste KS também é não paramétrico, e sua estatística se baseia na maior diferença absoluta entre as funções de probabilidades teórica, empírica e acumulada (NAGHETTINI; PINTO, 2007).

Ainda conforme Naghettini e Pinto (2007), as probabilidades empíricas q_i , correspondentes às ordens de classificação i , com número total de observações N , variam de acordo com as distribuições de probabilidade $F_x(x)$. Dada a distribuição $F_x(x)$ de Cunnane, que fornece quantis aproximadamente sem viés para quase todas as distribuições, a probabilidade empírica é determinada com a equação (1).

$$q_i = \frac{i - 0,40}{N + 0,2} \quad (1)$$

Uma vez definida a distribuição de probabilidade, foram determinadas as vazões associadas aos tempos de recorrência de 2, 10, 100, 1.000 e 10.000 anos por meio da função de quantil da GEV.

Todas as análises efetuadas para as séries amostrais estacionárias e não estacionárias foram desenvolvidas no R *software* (R CORE TEAM, 2024), em que foram utilizadas as bibliotecas *modifiedmk* (PATAKAMURI; O'BRIEN, 2022) e *trend* (POHLERT, 2023) para os testes de tendência, e *EnvStats* (MILLARD; KOWARIK, 2024) para a análise de frequência. O nível de significância adotado para os testes foi de 5%.

Índice de Risco

A vazão decamilenar obtida para a série histórica (Q_{hist}), não estacionária, foi estipulada como a vazão de projeto da usina, e foi comparada às vazões deca-

milenares determinadas para as séries com a estacionariedade corrigida (Q_{corr}). Essa comparação, proposta pelo presente trabalho como o índice de risco (I_R) da usina, é demonstrada na equação (2).

$$I_R = \frac{Q_{corr}}{Q_{hist}} \quad (2)$$

Logo, valores superiores a 1 representam situação de risco com possível subestimação da vazão de projeto da usina, enquanto valores inferiores a 1 se associam a um cenário conservador em relação à segurança da barragem.

Apesar do problema conceitual envolvido na aplicação do método estatístico para estimar a vazão decamilenar a partir da série histórica notadamente identificada com comportamento não estacionário, tal medida se fez necessária para viabilizar a análise de risco de todas as UHEs analisadas no presente trabalho, pois a maioria dos empreendedores não disponibiliza informações acerca da vazão de projeto adotada para o dimensionamento dos vertedouros das usinas.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Séries Afluentes com Tendência Temporal

Do total de 160 séries de vazões afluentes aos postos do ONS, 152 atenderam aos critérios de seleção. Destes, 70 apresentaram indícios de tendência temporal, de acordo com os resultados obtidos com o teste MK-TFPW, em termos de p-valor para $\alpha = 5\%$ (Apêndice 2). A interpretação deste resultado é feita comparando o resultado do p-valor com a significância α do teste, em que a hipótese nula (condição de estacionariedade) não é aceita caso o p-valor seja inferior ao nível de significância do teste.

Analisando este resultado por subsistema, conforme mostrado na Figura 4, nota-se cenários alarmantes nos subsistemas Norte e Nordeste, em que 75% e 78% das séries afluentes às usinas são estatisticamente não estacionárias, respectivamente. No subsistema Sudeste, onde estão localizadas 64% do total de UHEs analisadas, a maioria das séries afluentes foram enquadradas como estacionárias, e no subsistema Sul os resultados foram divididos.

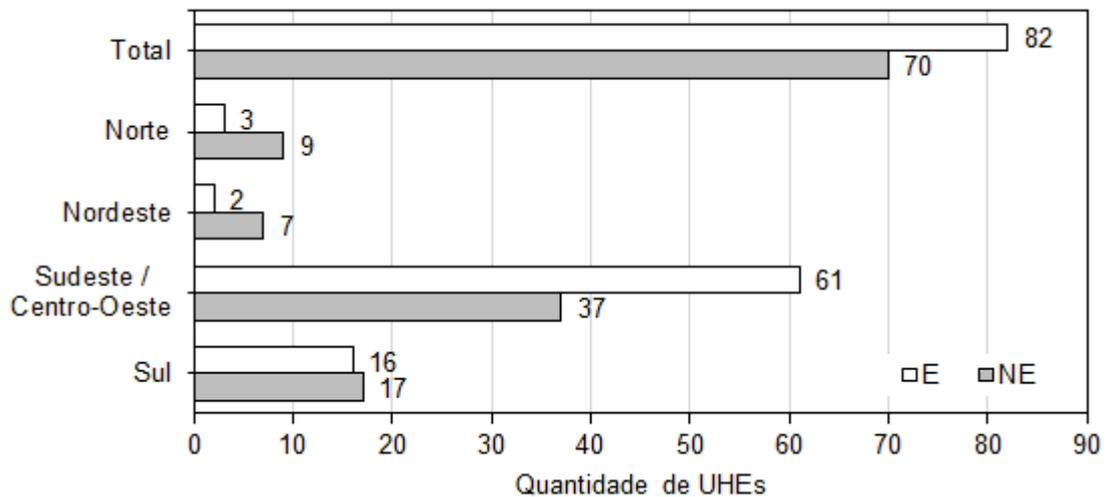


Figura 4 - UHEs por subsistema do SIN com afluição estacionária (E) e não estacionária (NE).

Identificação do Ponto de Quebra

De modo geral, a maioria das séries afluentes às UHEs apresentou mudança abrupta de tendência temporal na década de 90, conforme histograma apresentado na Figura 5. Avaliando este resultado por subsistema do SIN (Figura 6), nota-se que todas as UHEs do subsistema Nordeste e 89% das UHEs do subsistema Norte apresentaram quebra de tendência na década de 90. Para o subsistema Sul, a década de 80 foi o período de maior concentração de mudanças abruptas, com 71% de todas as usinas avaliadas. O subsistema Sudeste, por sua vez, não concentrou em apenas um período a mudança de tendência, mas apresentou quantidades distribuídas ao longo das décadas.

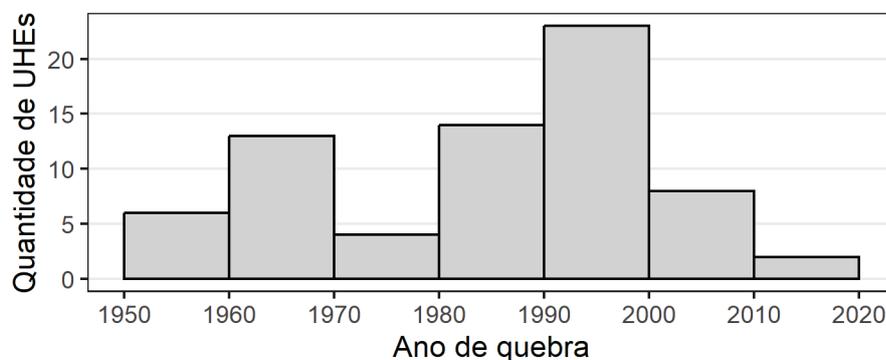


Figura 5 – Histograma dos anos de quebra na tendência temporal das séries não estacionárias.

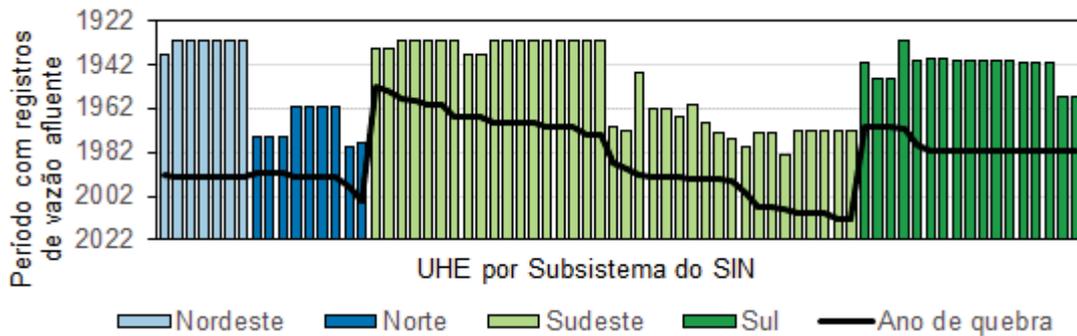


Figura 6 – Ano de quebra por subsistema do SIN.

A estacionariedade das afluições às usinas do SIN foi objeto de estudo por Detzel *et al.* (2011), que identificou que 100% das afluições dos subsistemas Norte e Nordeste não apresentam tendência na série de vazões médias, enquanto nos subsistemas Sul e Sudeste 100% e 43% das afluições apresentaram tendência, respectivamente. O contraste com os resultados obtidos no presente estudo é explicado tanto pela utilização de séries de médias ao contrário de máximos, quanto pelo ano de quebra adotado para a série histórica, pois a definição a priori do ano de 1969 como o ponto de divisão das sub amostras para posterior aplicação dos testes estatísticos se distancia consideravelmente dos resultados identificados através do teste de Pettitt aplicado no presente estudo.

Vazão de Projeto em Contexto Não Estacionário

Os métodos de correção da não estacionariedade foram aplicados para todas as séries afluentes às UHEs com comportamento não estacionário. Com isso, a cada usina foram associadas quatro séries hidrológicas: série histórica (HIS) estatisticamente não estacionária de máximos anuais; série estacionária corrigida através do método EQM; série estacionária corrigida através do método QAC, e série truncada (TRU) após o ponto de quebra de tendência.

Cada série hidrológica foi ajustada à distribuição GEV, e a qualidade do ajuste foi verificada por meio do resultado do teste KS, ao nível de significância de 5%, apresentado no Apêndice 3. Por meio deste resultado foi verificado que a distribuição GEV aderiu à maioria das séries hidrológicas, em que apenas a série EQM da usina

Caçu (247), e a série QAC da usina Espora (99) apresentaram p-valor inferior ao nível de significância do teste.

Em concordância com o resultado do teste KS, a análise visual do ajuste entre os dados amostrais e a função GEV foi satisfatória para as séries hidrológicas analisadas, conforme resultados apresentados no Apêndice 4.

A partir das vazões de projeto calculadas para o tempo de recorrência de 10.000 anos, foi obtido o índice de risco para os dois métodos de correção da não estacionariedade, bem como para a série truncada, de acordo com resultados mostrados na Figura 7. Na mesma imagem, é mostrada a localização das UHEs avaliadas, com identificação do sentido da tendência temporal detectada de aumento ou redução, segundo ajuste de regressão linear simples, elaborado a partir das vazões máximas anuais em função da cronologia de suas ocorrências. No Apêndice 5 são apresentados os resultados da regressão linear simples para todas as UHEs com afluências com tendência temporal.

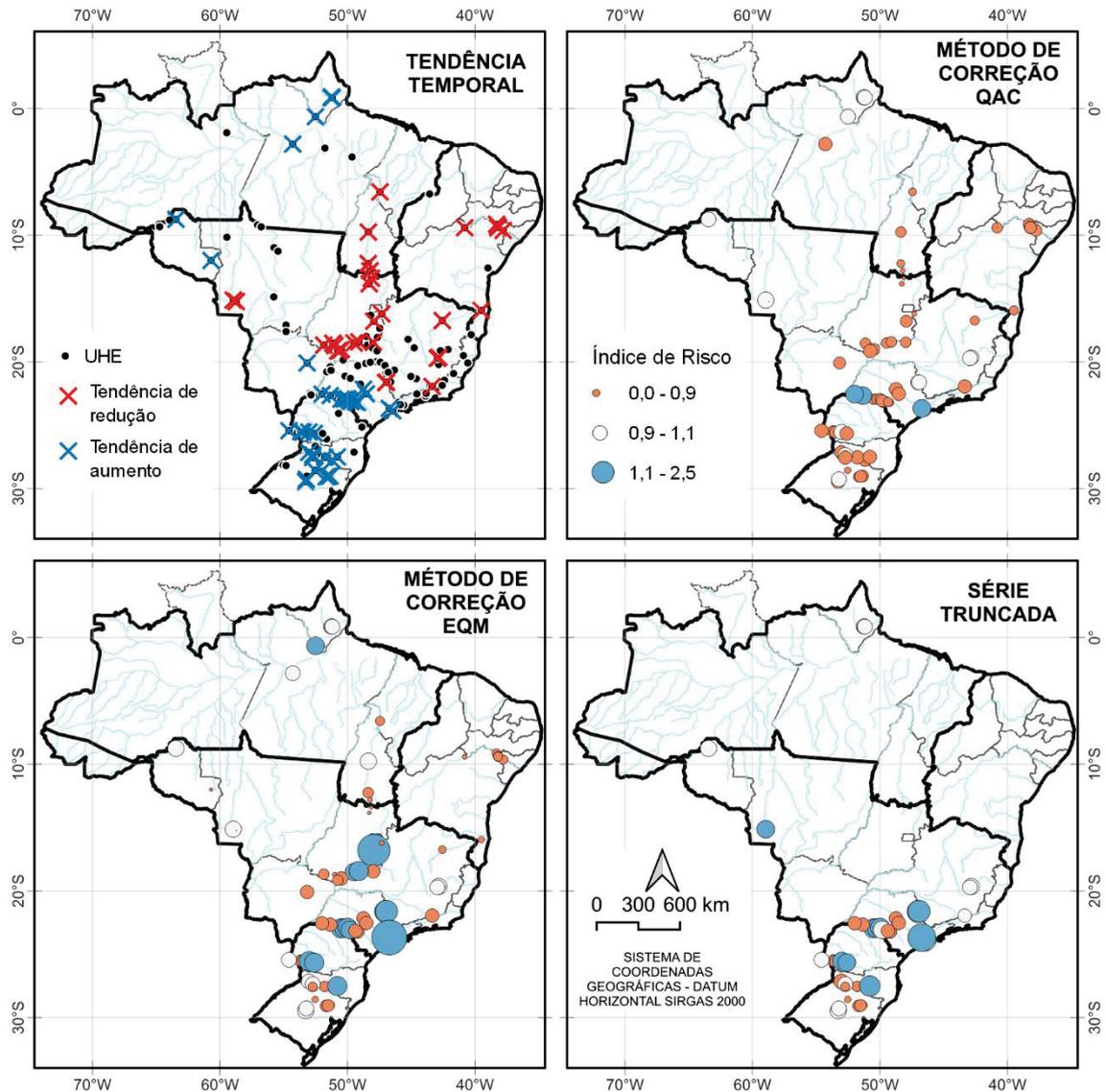


Figura 7 – UHEs com tendência temporal de aumento/redução na série de vazões máximas afluentes. Índice de risco por método de correção de não estacionariedade.

Verifica-se na Figura 7 a existência de padrão regional sobre as tendências temporais analisadas, com três zonas distintas. Ao Norte do Brasil, abrangendo praticamente toda a região amazônica (excluindo-se os estados do Tocantins e do Mato Grosso), e ao Sul do país, todas as afluentes das UHEs identificadas como não estacionárias apresentaram séries históricas com tendência de aumento na vazão máxima anual. A região intermediária do país, que inclui o Nordeste e parte das regiões Sudeste/Centro-Oeste e Norte, apresentou tendência de decaimento das vazões máximas anuais. O mesmo padrão regional foi previamente identificado por Souza e Reis (2022), Bartiko *et al.* (2019) e Chagas e Chaffe (2019).

Lima (2014) analisou as tendências em séries de vazões médias afluentes às UHEs do SIN sob a perspectiva das mudanças climáticas, e também identificou predomínio de aumento de vazões na região Sul e na parte sul da bacia do rio Paraná, enquanto no sul da Amazônia, em que estão incluídos os rios Madeira, Tapajós, Tocantins e Xingu, há indícios de redução de vazões.

Os índices de risco determinados para o método EQM para as 70 usinas do SIN com tendência temporal, mostraram que para 39% dos casos ocorreu subestimação da vazão de projeto em contexto não estacionário, com maior incidência regional dentro do subsistema Sudeste/Centro-Oeste. Considerando os resultados obtidos para a série truncada, que abrangeu apenas as 40 séries afluentes com ponto de quebra até o ano de 1991, 53% das usinas apresentaram subestimação da vazão de projeto, seguindo o mesmo padrão regional identificado para o método EQM.

Quanto ao método QAC, foi verificado que apenas 10% das usinas possuem vazão de projeto subdimensionada em contexto não estacionário, de acordo com os índices de risco calculados. Nominalmente, as 7 usinas com índice de risco superiores a 1 pelo método QAC foram: A.Dias+S.Car (1,01), Capivara (1,25), Guaporé (1,06), Guarapiranga (1,17), Itaúba (1,01), Samuel (1,03) e Taquaruçu (1,24). Comparando com os índices de risco obtidos para o método EQM e para a série truncada, deste grupo apenas as usinas A.Dias+S.Car (1,06 e 1,10), Guaporé (1,13 e 1,16), Guarapiranga (2,45 e 1,88) e Samuel (1,08 e 1,08) estariam com a vazão de projeto subestimada, resultando em 4 usinas com índice de risco em cenário alarmante para todas as metodologias aplicadas.

De modo geral, os métodos de correção da não estacionariedade divergem de forma significativa na magnitude da cheia de projeto obtida para uma mesma usina, com diferenças superiores à 10% na vazão de projeto para 63% dos casos. Em 34% das usinas analisadas, o índice de risco obtido com os métodos EQM e QAC apresentou sentidos opostos, subestimando ou superestimando a vazão de projeto em relação à calculada para a série histórica.

Com relação às séries truncadas, as vazões de projeto foram determinadas apenas para as séries de máximos anuais com pelo menos 30 dados, ou seja, para os casos em que o ponto de quebra ocorreu antes do ano de 1991, resultando em 40 séries afluentes. Com exceção das usinas Billings e Guarapiranga, as vazões de projeto definidas para as séries truncadas e as séries corrigidas pelo método EQM apresentaram grande semelhança, com variações inferiores a 10% na magnitude da

vazão decamilenar para 95% das usinas. Este resultado é explicado pela premissa do método EQM, que ao replicar os quantis do período após a quebra para dentro da série corrigida, deixa a série resultante com o mesmo padrão dos quantis da série truncada. Nos dois casos em que a diferença superou 10%, foi identificado possível *outlier* superior no período após a quebra da série histórica.

Para representar as análises, foram selecionadas as UHEs Cana Brava, Guarapiranga, Taquaruçu (situadas no subsistema Sudeste/Centro-Oeste) e Itaúba (subsistema Sul). Na Figura 8 são apresentadas as tendências lineares de cada série histórica, bem como as vazões de cheia definidas através da função quantil da distribuição GEV.

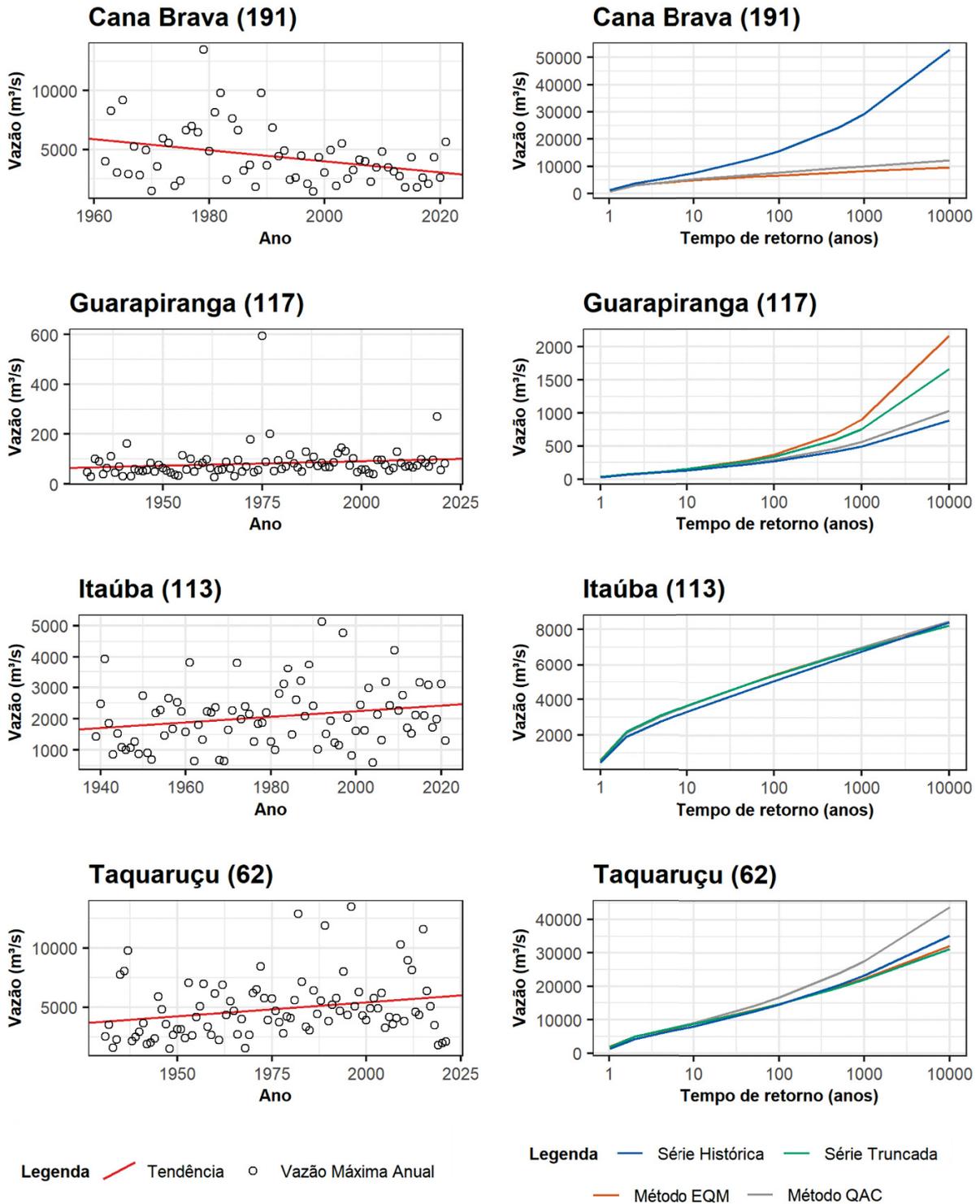


Figura 8 – Regressão linear de séries históricas e vazões de cheia das UHEs Cana Brava, Guarapiranga, Itaúba e Taquaruçu.

A série afluyente da UHE Cana Brava exemplifica uma condição de superestimação da vazão de projeto no contexto não estacionário. Os máximos anuais registrados apresentam tendência de decaimento, e a vazão de projeto obtida com a

série histórica é cerca de cinco vezes superior à que foi determinada para as séries com a tendência temporal removida. Neste caso, ressalta-se o impacto do possível *outlier* superior registrado no ano de 1979 nos índices de risco obtidos para a usina, equivalentes a 0,18 (EQM) e 0,23 (QAC), dado que o ano de quebra da série se situa na década de 90, ou seja, ao corrigir a tendência nos dados o peso deste *outlier* na série foi suavizado, influenciando assim no ajuste com a distribuição de máximos.

No cenário oposto, tem-se a UHE Guarapiranga, com índices de risco equivalentes a 2,45 (EQM), 1,17 (QAC) e 1,88 (TRU), indicando subestimação da vazão de projeto obtida com a série histórica, que apresenta tendência de aumento nas vazões registradas. Novamente, percebe-se presença de possível *outlier* superior em 1975, mas, como o ano de quebra da série foi identificado em 1974, o valor observado foi mantido em todas as séries analisadas, elevando os quantis da distribuição de máximos anuais das séries corrigidas.

Embora tanto a UHE Itaúba quanto a UHE Taquaruçu apresentem tendência de aumento na série de vazões máximas afluentes, com padrão gráfico similar na dispersão dos dados, os índices de risco determinados para cada usina apresentaram sentidos distintos. Para a UHE Itaúba, os índices de risco obtidos foram 1,00 (EQM), 1,01 (QAC) e 0,98 (TRU), enquanto para a UHE Taquaruçu foram obtidos os valores 0,91 (EQM), 1,24 (QAC) e 0,89 (TRU). Ou seja, se para a UHE Itaúba não houve diferença significativa na vazão de projeto estimada com a série histórica e após as correções na tendência, a UHE Taquaruçu mostrou que com a série truncada e a série corrigida pelo método EQM a vazão de projeto estaria superestimada, mas com a correção QAC ocorreria subestimação da vazão decamilenar. Essa divergência encontrada nas vazões de projeto está associada às séries de máximos anuais corrigidas pelos métodos EQM e QAC, mostradas na Figura 9, em que foram incluídos os resultados da aplicação dos dois métodos de correção para as duas usinas.

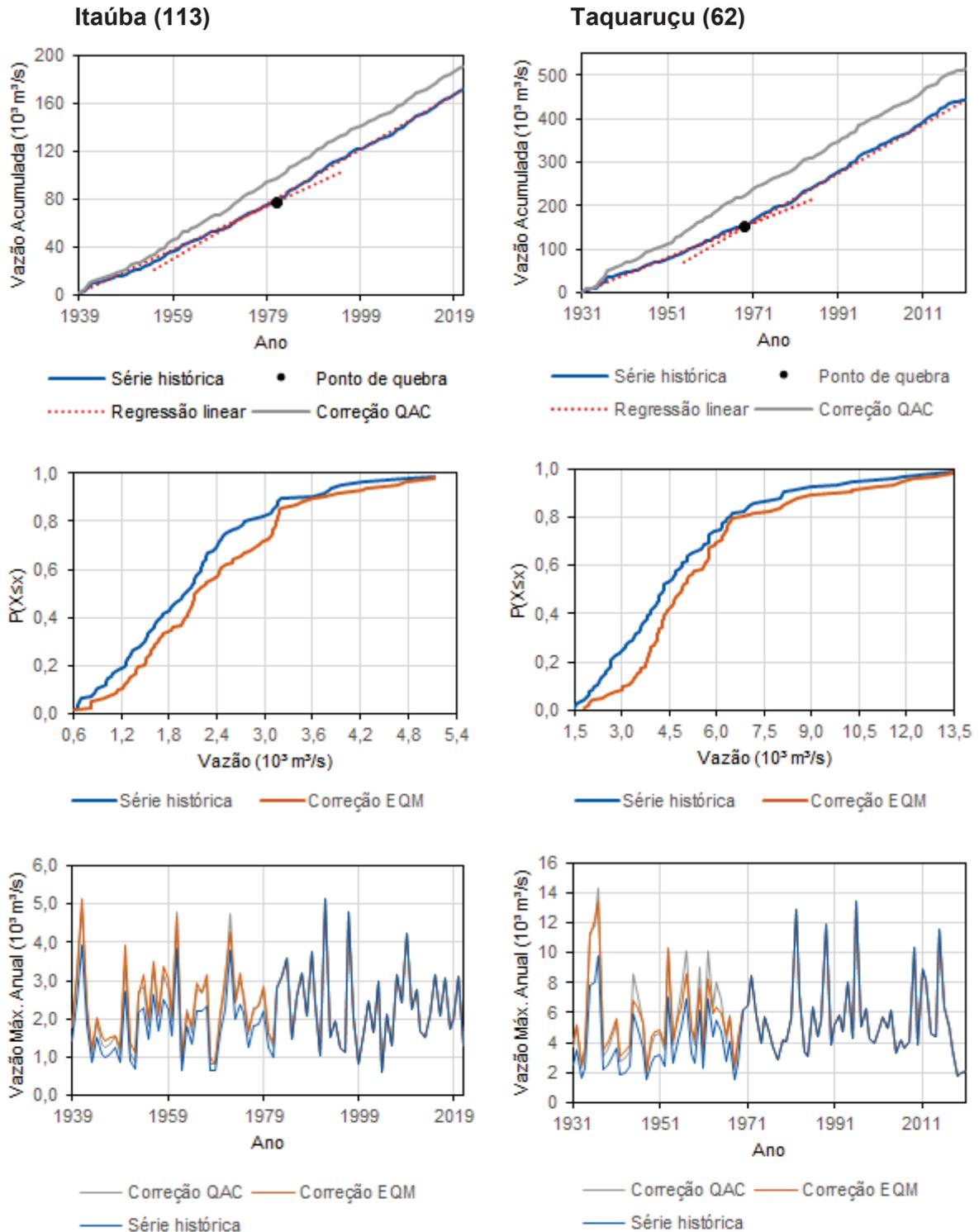


Figura 9 – Métodos EQM e QAC de correção da não estacionariedade das séries de máximos anuais das usinas Itaúba e Taquaruçu.

Com o método QAC, pressupõe-se que os dados seguem uma tendência linear, e é utilizada a relação entre os coeficientes angulares antes e após a quebra para multiplicar a série mais antiga, condição que aproxima a série corrigida da série

histórica nos anos com as menores vazões, e tem efeito contrário nos anos com maior deflúvio. O método EQM, por sua vez, é mais versátil na correção da não estacionariedade, e tem maior poder de representar o comportamento da tendência temporal nesta correção.

O comportamento distinto das séries corrigidas foi determinante para a variação no sentido do índice de risco de cada usina, apresentado na Figura 7. A aplicação do método QAC com a finalidade de correção da estacionariedade dos dados requer cautela, pois a não aderência da série a uma tendência linear resultará em valores sem representatividade.

Outro fator relevante sobre os métodos de correção da não estacionariedade foi a presença de *outliers* na série histórica, que a depender da cronologia do evento em relação ao ano de quebra da série, podem suavizar ou potencializar o seu impacto na condução da análise de frequência.

Ressalta-se que embora a condução da análise de frequência com a série histórica não estacionária represente um problema conceitual, essa análise foi produzida com o intuito de comparar o impacto que uma análise expedita de ajuste de máximos pode causar sobre a definição da vazão de projeto de uma usina. Além disso, foi uma etapa necessária para determinar o índice de risco de todas as UHEs em que foram detectados indícios de não estacionariedade frente a indisponibilidade destes dados de projeto para a maioria dos empreendimentos analisados.

Comparativo com a Vazão de Projeto Adotada no Dimensionamento dos Principais Vertedouros Brasileiros com as Vazões Decamilenares Estimadas em Contexto Não Estacionário

A vazão de projeto efetivamente adotada para o dimensionamento dos principais vertedouros brasileiros foi a cheia decamilenar (CD) ou a cheia máxima provável (CMP) (CBDB, 2010 *apud* CAVALCANTI, 2014). Dentre estes grandes empreendimentos, para os que apresentaram aflúncias com tendência temporal, foi realizada a comparação entre a vazão de projeto do dimensionamento com as vazões decamilenares estimadas a partir dos métodos de correção da não estacionariedade, Figura 10. Destaca-se que estes resultados não foram comparados aos obtidos com o truncamento da série histórica devido à similaridade das vazões de projeto determinadas através do método EQM.

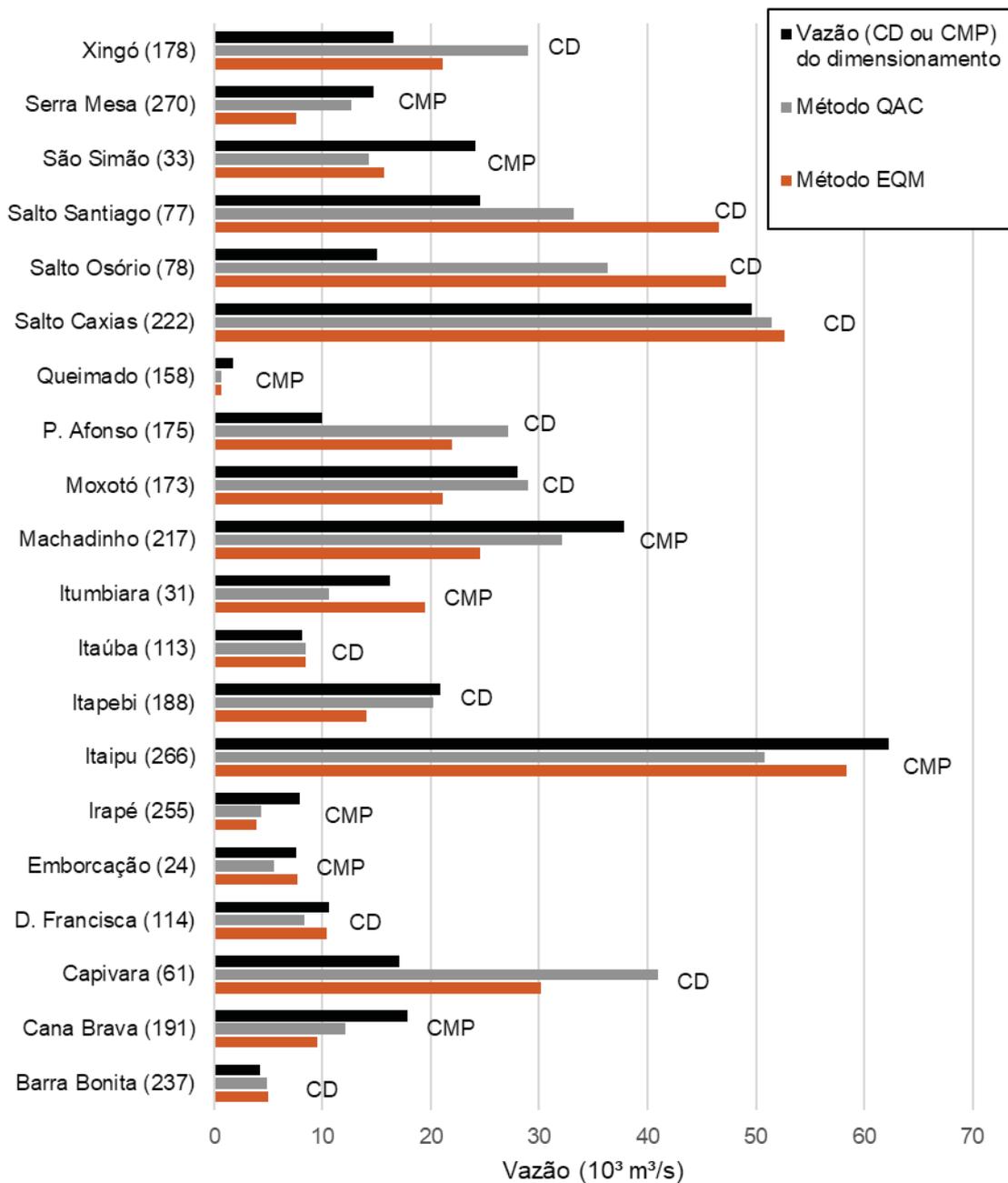


Figura 10 – Comparativo entre vazões decamilenares estimadas com os métodos EQM e QAC de correção da não estacionariedade com a vazão de projeto adotada no dimensionamento dos principais vertedouros brasileiros (CD = cheia decamilenar, CMP = cheia máxima provável).

De modo geral, foi verificado que os grandes empreendimentos cujos vertedouros foram dimensionados com base na CMP estão em condições conservadoras, com exceção da UHE Itumbiara, em que a CMP (16.270 m³/s) foi inferior a vazão decamilenar obtida através do método EQM (19.475 m³/s). Na condição oposta, das 11 usinas em que foram adotadas CDs para o dimensionamento dos vertedouros, 9 apresentaram vazões de projeto inferiores às que foram estimadas para o TR 10.000 anos com ao menos um dos métodos de correção da não

estacionariedade. Nominalmente, foram detectados indícios de subdimensionamento dos dispositivos extravasores das UHEs Barra Bonita, Capivara, Itaúba, Moxotó, P. Afonso, Salto Caxias, Salto Osório, Salto Santiago e Xingó.

O índice de risco dessas usinas foi recalculado em relação a vazão efetivamente adotada no dimensionamento dos vertedouros, conforme mostrado na Figura 11. É possível verificar que para vários empreendimentos de grande porte o índice de risco foi superior a 1, ou seja, são barragens em que a vazão de projeto adotada no dimensionamento está subdimensionada no contexto não estacionário.

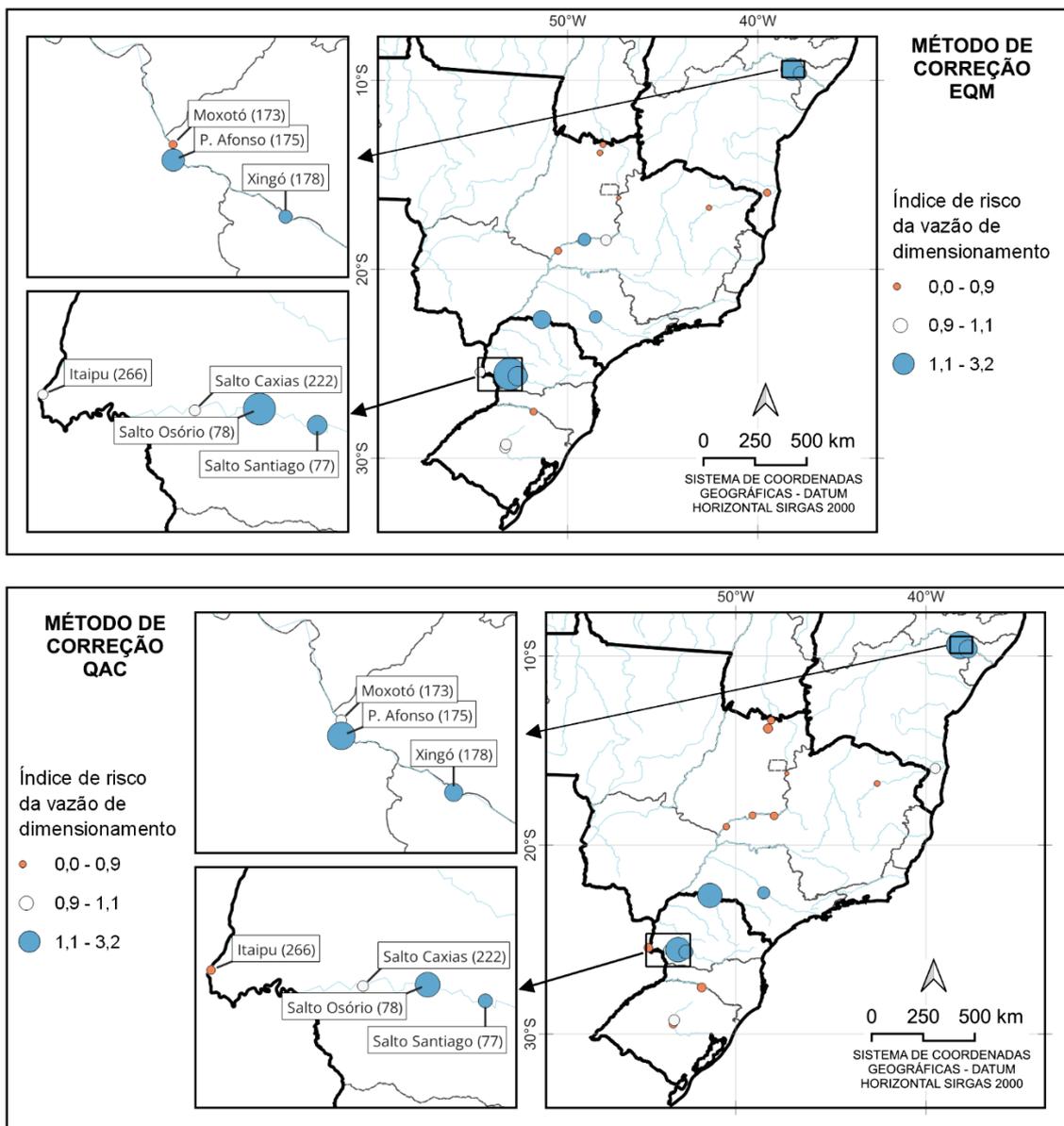


Figura 11 – Índice de risco determinado a partir da vazão adotada no dimensionamento dos grandes vertedouros brasileiros, em relação a vazão decamilenar estimada através dos métodos EQM e QAC de correção da não estacionariedade.

Destaca-se a presença de empreendimentos em cascata e em situação alarmante, como as UHEs Salto Santiago, Salto Osório e Salto Caxias, situadas no rio Iguaçu, e as UHEs P. Afonso e Xingó, no rio São Francisco. Avaliando as tendências temporais previamente identificadas para estes locais, enquanto o rio Iguaçu mostra tendência de crescimento nas vazões máximas anuais desde a década de 80, o rio São Francisco teve declínio em suas defluências desde a década de 90.

Estes resultados chamam a atenção para o fator de incerteza relacionado a ajustes de distribuições de probabilidade com séries de pequena duração, pois ainda que na fase de projeto desses empreendimentos não fosse perceptível a presença de tendência nas afluições, a vazão que foi projetada à época para o TR 10.000 anos para as UHEs P. Afonso e Xingó é mais baixa do que a que seria obtida atualmente, com cerca de 20 anos de registros apresentando decaimento na série de máximos anuais.

Neste sentido, reforça-se a importância da Lei 12.334, de 20 de setembro de 2010, que estabeleceu a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB), cujo Art. 10 determinou a obrigatoriedade da atualização periódica dos dados hidrológicos para verificação do estado geral de segurança das barragens, considerando o atual estado da arte para os critérios de projeto (BRASIL, 2010). Com a obrigatoriedade legal deste tipo de revisão, é possível identificar empreendimentos subdimensionados e realizar adequações em seus respectivos dispositivos de vertimento para diminuir a probabilidade de ocorrência de colapsos.

CONCLUSÃO

Dentre as UHEs que compõem o SIN, foi identificada quantidade expressiva de séries máximas afluentes com comportamento não estacionário, ou seja, séries em que os momentos estatísticos variam ao longo do tempo. Em 70 das 152 séries analisadas foi detectado indício de tendência temporal com sentido bem definido regionalmente, onde a parte central do país denota redução nas vazões diárias máximas anuais e nos extremos do Brasil os indícios são de aumento no deflúvio.

Para os empreendimentos com indícios de subestimação da vazão de projeto em contexto não estacionário, recomenda-se a condução de estudos de viabilidade técnica para aumentar a capacidade de descarga do sistema extravasor existente ou, se pertinente, aumentar o volume de amortecimento do reservatório. Especificamente

para as usinas em cascata com indícios de subdimensionamento, sugere-se planejamento para definir regras de operação que garantam a passagem do deflúvio em segurança. No sentido oposto, os empreendimentos com possível superestimação da vazão de projeto representam condições de segurança conservadoras.

A maioria das mudanças abruptas nas séries afluentes analisadas foi registrada na década de 90, onde destaca-se que este foi o período de alterações críticas para 94% das UHEs situadas nos subsistemas Norte e Nordeste. Com relação as UHEs situadas no subsistema Sul, 71% apresentaram mudança de tendência na década de 80. O subsistema Sudeste, que detém a maioria dos empreendimentos, mostrou resultados de quebra na tendência distribuídos entre todas as décadas.

De modo geral, os métodos de correção da não estacionariedade avaliados no presente trabalho mostraram grande sensibilidade à presença de *outliers* nas séries amostrais e, assim como outros modelos não estacionários, introduzem um fator de incerteza aos valores extrapolados para o futuro por assumirem que a tendência incorporada à série corrigida seguirá a mesma da que foi observada.

Não obstante, frente aos efeitos das ações antrópicas sobre o ciclo hidrológico, torna-se imprescindível o desenvolvimento de metodologias que incorporem estas novas tendências ainda na fase de projeto ou para a possível adequação de estruturas existentes.

O método EQM, proposto pelo presente trabalho para a correção da não estacionariedade em séries hidrológicas, apresentou resultados satisfatórios na condução da análise de frequência de extremos, com capacidade de incorporar o padrão das mudanças observadas na série temporal para o período corrigido sem introduzir complexidade excessiva em sua aplicação. Em relação a outros modelos não estacionários, possui o benefício de não incorporar incertezas acerca de covariáveis, mas pode introduzir autocorrelação nos dados amostrais.

A alternativa de truncamento da série histórica no período após a quebra produziu resultados similares aos obtidos com o método EQM, com diferenças inferiores a 10% nas magnitudes das vazões decamilenares determinadas para 95% das UHEs analisadas. Como essa alternativa reduz a extensão temporal da série de dados, há aumento da incerteza acerca dos resultados obtidos com o ajuste da distribuição de probabilidade.

Quanto ao método QAC, ainda que seja uma alternativa expedita de correção da não estacionariedade, frente aos resultados obtidos no presente estudo não se

recomenda a sua aplicação com a finalidade de determinação de vazões de projeto. A simplificação envolvida na linearização da tendência por este método tem baixo poder de representar o padrão real da série amostral, que pode não ser linear.

Considerando as características e limitações dos métodos de correção da não estacionariedade EQM, QAC e a alternativa de truncamento da série histórica, para todos os casos recomenda-se que a sua aplicação seja precedida por análise de *outliers*. Em relação ao método QAC, sugere-se que sua aplicação seja motivada para detecção de tendência nos dados. A alternativa de truncamento da série histórica é recomendada para análises expeditas, em razão do desempenho satisfatório aliado ao aumento da incerteza pela redução da série amostral. Quanto ao método EQM, ressalta-se a importância de que seja aplicado considerando o ano hidrológico regional na extração de valores extremos, para diminuir a possibilidade da introdução da autocorrelação na série amostral.

Finalmente, ainda que não exista consenso sobre a utilização de modelos não estacionários, a quantidade expressiva de UHEs com séries máximas afluentes com tendência temporal identificadas no presente estudo reforça a importância do desenvolvimento de metodologias que abordem essa condição para a previsão de vazões com alta recorrência, especialmente para a avaliação da segurança de estruturas sob a perspectiva dos riscos hidrológicos.

REFERÊNCIAS

ALVES, B. C. C.; SOUZA, F. A.; SILVEIRA, C. S. Análise de tendências e padrões de variação das séries históricas de vazões do Operador Nacional do Sistema (ONS). **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 18, n. 4, p. 19-34, 2013.

ANA. **Guia de Revisão Periódica de Segurança de Barragem**. Brasília: ANA, 2016.

ANEEL. **SIGA - Sistema de Informações de Geração da ANEEL**. 2024. Disponível em: <<https://app.powerbi.com/view?r=eyJrljoiNGE3NjVmYjAtNDZkZC00MDY4LTIiINTItMTVhZTU4NWYzYzFmIiwidCI6IjQwZDZmOWI4LWVjYjYtYjYtNDZkZmI05MmQ0LWVhNjY5YzAxNzBIMSIsImMiOjR9>>. Acesso em: 10 jun. 2024.

ANZOLIN, G.; OLIVEIRA, D. Y.; VRUGT, J. A.; AGHAKOUCHAK, A.; CHAFFE, P. L. B. Nonstationary frequency analysis of extreme precipitation: Embracing trends in observations, **Journal of Hydrology**, local, v. 637, 2024.

BARTIKO, D.; CHAFFE, P. L. B.; BONUMÁ, N. B. Nonstationarity in maximum annual daily streamflow series from Southern Brazil. **Brazilian Journal of Water Resources**, Porto Alegre, v. 22, e. 48, 2017. DOI. 10.1590/2318-0331.0217170054.

BARTIKO, D.; OLIVEIRA, D. Y.; BONUMÁ, N. B.; CHAFFE, P. L. B. Spatial and seasonal patterns of flood change across Brazil. **Hydrological Sciences Journal**, v. 64, n. 9, p. 1071-1079, 2019. DOI. 10.1080/02626667.2019.1619081.

BATISTA, A. L., FREITAS JR., S. A., DETZEL, D. H. M., MINE, M. R. M. FILL, H. D. O. A., FERNANDES, C. KAVISKI, E. Verificação da estacionariedade de séries hidrológicas no Sul-Sudeste do Brasil. *In* SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 18., 2009. Campo Grande. **Anais...** Porto Alegre: ABRH, 2009, p. 1-19.

BRASIL. **Lei nº 12.334, de 20 de setembro de 2010.** Estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens. Brasília, DF. 2010. Disponível em: <https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12334.htm>. Acesso em: 10 jun. 2024.

CAVALCANTI, D. L. O. **Estudo comparativo de métodos de estimação de vazões máximas de projeto para grandes bacias hidrográficas.** 2014. 226 f. Dissertação (Mestrado em Ciências: Engenharia Hidráulica e Saneamento) – Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos, Programa de Pós Graduação, Departamento de Hidráulica e Saneamento, São Carlos, 2014.

CHAGAS, V. B. P.; CHAFFE, P. L. B. Não estacionariedade é inevitável! Causas das recentes mudanças de vazões no Brasil. *In*: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 23, 2019, Foz do Iguaçu. **Anais...** Foz do Iguaçu: ABRH, 2019. Disponível em: <<https://files.abrhidro.org.br/Eventos/Trabalhos/107/XXIII-SBRH0290-1-20190423-184803.pdf>>. Acesso em: 10 jun. 2024.

DETZEL, D. H. M. **Modelagem de séries hidrológicas:** uma abordagem de múltiplas escalas temporais. 2015. 214 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental) – Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental, Curitiba, 2015.

DETZEL, D. H. M.; BESSA, M. R.; VALLEJOS, C. A. V.; SANTOS, A. B.; THOMSEN, L. S.; MINE, M. R. M.; BLOOT, M. L.; ESTRÓCIO, J. P. Estacionariedade das Afluências às Usinas Hidrelétricas Brasileiras. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 16, n. 3, p. 95-111, 2011.

ELETROBRÁS. **Critérios de projeto civil de usinas hidrelétricas.** Rio de Janeiro: Centrais Elétricas Brasileiras S.A., 2003.

ELETROBRÁS. **Guia para cálculo de cheia de projeto de vertedores.** Rio de Janeiro: Centrais Elétricas Brasileiras S.A., 1987.

ESPINOSA, H.; GRANEMANN, A.; SCHETINGER, L. Estacionariedade de séries de vazão e precipitação no extremo oeste catarinense. *In*: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 22., 2017, Florianópolis. **Anais...** Florianópolis. ABRH, 2017. Disponível em: < <https://anais.abrhidro.org.br/job.php?Job=2177> >. Acesso em: 10 jun. 2024.

FRANÇOIS, B.; SCHLEF, K. E.; WI, S.; BROWN, C. Design considerations for riverine floods in a changing climate – a review. **Journal of Hydrology**, v. 574. p. 557-573, 2019. DOI. 10.1016/j.jhydrol.2019.04.068.

GAO, Y.; XIA, J.; CHEN, X.; ZOU, L.; HUANG, J.; YU, J. Analysis of the nonstationarity characteristics and future trends of flood extremes in the Dongting Lake Basin. **Journal of Hydrology: Regional Studies**, n. 44, 2022. DOI. 10.1016/j.ejrh.2022.101217.

HOLTHUIJZEN, M.; BECKAGE, B.; CLEMINS, P. J.; HIGDON, D.; WINTER, J. M. Robust bias-correction of precipitation extremes using a novel hybrid empirical quantile-mapping method: Advantages of a linear correction for extremes. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 149, p. 863–882. 2022. DOI 10.1007/s00704-022-04035-2.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). **Climate Change 2021: The Physical Science Basis**. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, USA. p. 2391, 2021. DOI. 10.1017/9781009157896.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). **Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability**. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, USA. p. 3056, 2022. DOI. 10.1017/9781009325844.

ISENSEE, L. J.; PINHEIRO, A.; DETZEL, D. H. M. dam hydrological risk and the desing flood under non-stationary conditions. **Water Resources Management**, v. 35, p. 1499-1512, 2021.

LIMA, J. **Efeitos das mudanças climáticas na geração de energia elétrica**. AES Tietê São Paulo – SP, 360 p., 2014.

LINS, H. F.; COHN, T. A. Stationarity: Wanted dead or alive? **Journal of the American Water Resources Association (JAWRA)**, v. 47, n. 3, p. 475-488, 2011. DOI: 10.1111/j.1752-1688.2011.00542.x.

MELCHIOR, J. V. **Vazões de projeto sob condições não estacionárias**: uma aplicação para usinas hidrelétricas no Brasil. 2022. 154 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental) – Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental, Curitiba, 2022.

MILLARD, S. P.; KOWARIK, A. **EnvStats**: Package for environmental statistics, including US EPA Guidance. 2024. R package version 3.0.0, Disponível em: <<https://cran.r-project.org/web/packages/EnvStats/index.html>>. Acesso em: 10 jun. 2024.

MILLÉO, C.; PLOSZAI, R.; MINE, M. R. M. Análise de tendências na série histórica de precipitações em Curitiba. *In*: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS,

21., 2015, Brasília. **Anais...** Brasília. ABRH, 2015. Disponível em: <<https://files.abrhidro.org.br/Eventos/Trabalhos/4/PAP019316.pdf>>. Acesso em: 10 jun. 2024.

MILLY, P. C. D.; BETANCOURT, J.; FALKENMARK, M.; HISRCH, R. M.; KUNDZEWICZ Z. W.; LETTENMAIER D. P.; STOUFFER, R. J. Stationarity is dead: Whither water management? **Science**, v. 319, n. 5863, p. 573-574, 2008. DOI. 10.1126/science.1151915.

NAGHETTINI, M.; PINTO, E. **Hidrologia Estatística**. Belo Horizonte: CPRM, 2007.

NASHWAN, M. S.; ISMAIL, T.; AHMED, K. Non-stationary analysis of extreme rainfall in Peninsular Malaysia. **Journal of Sustainability Science and Management**, v. 14, n. 3, p. 17–34, 2019.

OBEYSEKERA, J.; SALAS, J. D. Quantifying the uncertainty of design floods under nonstationary conditions. **Journal of Hydrologic Engineering**, v. 19, n. 7, p. 1438–1446, 2014. DOI. 10.1061/(asce)he.1943-5584.0000931.

ONS. **O sistema em números**. 2024. Disponível em: <<https://www.ons.org.br/paginas/sobre-o-sin/o-sistema-em-numeros>>. Acesso em: 10 jun. 2024.

ONS. **Revisão das séries de vazões naturais em bacias do Sistema Interligado Nacional**: Relatório Executivo. 2011. Disponível em: <https://www.ons.org.br/sites/multimedia/Documentos%20Compartilhados/vazoes_naturais/2011/2.html>. Acesso em: 10 jun. 2024.

PATAKAMURI, S. K.; O'BRIEN, N. **modifiedmk**: Modified versions of Mann Kendall and Spearman's Rho trend tests. 2022. R package version 1.6, Disponível em: <<https://cran.r-project.org/web/packages/modifiedmk/index.html>>. Acesso em: 10 jun. 2024.

POHLERT, T. **trend**: Non-parametric trend tests and change-point detection. 2023. R package version 1.1.6, Disponível em: <<https://CRAN.R-project.org/package=trend>>. Acesso em: 10 jun. 2024.

R CORE TEAM. **R**: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. Disponível em: <<https://www.R-project.org/>>. Acesso em: 10 jun. 2024.

RAZMI A.; GOLIAN, S.; ZAHMATKESH, Z.; Non-stationary frequency analysis of extreme water level: Application of annual maximum series and peak-over threshold approaches. **Water Resources Management**, v. 31, n. 7, p. 2065-2083, 2017. DOI. 10.1007/s11269-017-1619-4.

SERAGO, J. M.; VOGEL, R. M. Parsimonious nonstationary flood frequency analysis. **Advances in Water Resources**, v. 112, p. 1-16, 2018.

SOUZA, S. A.; REIS, D. S. Trend detection in annual streamflow extremes in Brazil. **Water**, Switzerland, v. 14, n. 11., 2022. DOI. 10.3390/w14111805.

SRAJ, M.; VIGLIONE, A.; PARAJKA, J.; BLOSCHL, G. The influence of non-stationarity in extreme hydrological events on flood frequency estimation. **Journal of Hydrology and Hydromechanics**, v. 64, n. 4, p. 426-437, 2016. DOI. 10.1515/johh-2016-0032.

TRENBERTH, K. Changes in precipitation with climate change. **Climate Research**, v. 47, n. 1–2, p. 123–138, 2011. DOI. 10.3354/cr00953.

ULIANA, E. M.; SILVA, D. D.; ULIANA, E. M.; RODRIGUES, B. S.; CORRÊDO, L. P. Análise de tendência em séries históricas de vazão e precipitação: uso de teste estatístico não paramétrico. **Revista Ambiente e Água**, v. 10, n. 1, p. 82-88, 2015. DOI.10.4136/1980-993X.

VILLARINI, G.; SMITH, J. A.; BAECK, M. L.; KRAJEWSKI, W. F. Examining flood frequency distributions in the Midwest U.S. **Journal of the American Water Resources Association (JAWRA)**, v. 47, n. 3, p.447–463, 2011. DOI. 10.1111/j.1752-1688.2011.00540.x.

YUE, S.; WANG, C. Y. Applicability of prewhitening to eliminate the influence of serial correlation on the Mann-Kendall test. **Water Resources Research**, v. 38, n. 6, 4-7, 2002. DOI. 10.1029/2001wr000861.

4 CONCLUSÃO

O estudo desenvolvido compreendeu a análise do estado da arte para a incorporação dos efeitos das mudanças climáticas no mapeamento de áreas suscetíveis a inundações fluviais em grande escala, considerando a aplicação das tecnologias disponíveis capazes de simular os diferentes cenários de elevação da temperatura média global e as consequências nos deflúvios das bacias hidrográficas.

Notadamente, existem muitas incertezas associadas aos resultados obtidos com este tipo de abordagem, dada a influência na escolha dos cenários representativos de concentrações de gases do efeito estufa, modelos climáticos globais, resolução espacial da simulação, representação das variáveis físicas, condições de umidade antecedente do solo, entre outros.

Mesmo com o desenvolvimento contínuo da tecnologia para reduzir essas incertezas, a grande complexidade para a condução de análises de riscos baseadas em modelos de mudanças climáticas ainda constitui uma barreira para serem introduzidos em manuais de projeto de obras hidráulicas.

Frente à problemática envolvida na estimativa de vazões de projeto com os efeitos do aquecimento global sobre o ciclo hidrológico, pode-se aumentar a magnitude do evento ou majorar a sua recorrência, a depender do que for mais restritivo, de acordo com recomendações elaboradas para regiões específicas, como o Sul do Brasil (PAIVA *et al.*, 2024).

Para aplicações distintas, o emprego de modelos hidrológicos desenvolvidos para considerar as condições da não estacionariedade constituem uma alternativa para incorporar as tendências de eventos hidrológicos extremos mais intensos e mais frequentes nas estimativas de vazões de projeto.

Neste trabalho, foi identificada quantidade expressiva de UHEs com séries afluentes máximas diárias com comportamento não estacionário, com tendências de aumento no deflúvio nas áreas situadas ao Sul e ao Norte do país. De modo geral, verificou-se que para os subsistemas Norte e Nordeste a maioria das séries afluentes às UHEs apresentou comportamento não estacionário, com 75% e 78%, respectivamente. Deste total, a década de 90 foi o período que concentrou a mudança abrupta para 100% e 89% das afluições nos subsistemas Norte e Nordeste, respectivamente.

Especificamente para o subsistema Norte, localizado em grande parte na região da floresta Amazônica, avalia-se a possibilidade de a mudança abrupta na tendência estar associada aos efeitos da alteração no uso e ocupação do solo. Segundo Fearnside (2022), entre as décadas de 70 e 80 as taxas de desmatamento da floresta se mantiveram em níveis elevados, na ordem de 20.400 km²/ano, motivadas principalmente por incentivos fiscais e planos governamentais de fomento a ocupação da região. Em grande parte, as áreas desmatadas foram destinadas a agropecuária, que faz com que a precipitação escoe rapidamente aos cursos de água, aumentando o deflúvio.

Para avaliar a segurança destes empreendimentos sob a perspectiva do risco hidrológico, foi determinada a vazão decamilenar considerando a abordagem tradicional que assume a estacionariedade dos dados amostrais e sob o contexto da não estacionariedade, em que foram comparados dois métodos de correção dos dados além de propor uma alternativa de truncamento da série histórica contida no período após o ponto de mudança abrupta no comportamento da série.

Verificou-se que o método QAC, conhecido por representar uma alternativa expedita de correção da não estacionariedade, resultou em vazões decamilenares inferiores às obtidas para as demais séries hidrológicas e de modo geral não coincidiu com a tendência regional identificada de aumento/redução nas vazões máximas anuais. A simplificação inerente do método de linearizar a tendência restringe a capacidade de representar as oscilações do comportamento da série e pode produzir resultados sem representatividade.

O método EQM, proposto no presente trabalho para a correção da não estacionariedade em séries hidrológicas, tem como benefícios a facilidade de implementação, a não introdução de incertezas relacionadas a covariáveis e a capacidade satisfatória de assimilar as tendências temporais identificadas nas séries históricas. Todavia, faz-se ressalvas quanto a sensibilidade do modelo frente a presença de *outliers* e a possibilidade da introdução de autocorrelação na série amostral. O truncamento da série histórica no período após o ponto de quebra foi visto como alternativa eficaz para identificar a magnitude da vazão de grandes recorrências, dada semelhança com os resultados obtidos com o método EQM, mas, como resulta em séries temporais mais curtas, os valores resultantes possuem maior incerteza.

Vale destacar que a determinação da vazão decamilenar com séries não estacionárias constitui um problema conceitual que foi assumido em razão da

indisponibilidade de informações sobre a vazão de projeto da grande maioria das UHEs brasileiras. Para os grandes vertedouros nacionais em que foi possível identificar o método de cálculo e a magnitude da vazão, constatou-se que a adoção da cheia máxima provável para o dimensionamento dos dispositivos extravasores é uma metodologia conservadora mesmo em comparação com as séries com tendência de aumento que foram corrigidas pelos modelos não estacionários.

Independentemente do debate acerca da aplicabilidade de modelos não estacionários ou de projeções dos efeitos das mudanças climáticas para predição de vazões de alta recorrência, os eventos hidrológicos extremos registrados em maior frequência ao longo da última década reforçam a necessidade por mais estudos científicos nesta temática, para apoiar avaliações de risco em diversas áreas da engenharia.

Não obstante, recomenda-se que estudos futuros com o uso de técnicas adequadas sejam realizados para atribuir as causas associadas às mudanças de tendência, investigando os efeitos do uso e ocupação do solo, precipitação e evaporação sobre o deflúvio.

BRASIL. **Lei nº 12.334, de 20 de setembro de 2010**. Estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens. Brasília, DF. 2010. Disponível em: <https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12334.htm>. Acesso em: 10 jun. 2024.

BRÊDA, J. P. L. F.; PAIVA, R. C. D.; SIQUEIRA, V. A.; COLLISCHONN, W. Assessing climate change impact on flood discharge in South America and the influence of its main drivers. **Journal of Hydrology**, v. 619, 2023. DOI. 10.1016/j.jhydrol.2023.129284.

CAMILLONI, I. A.; SAURRAL, R. I.; MONTRUOLL, N. B. Hydrological projections of fluvial floods in the Uruguay and Paraná basins under different climate change scenarios. **International Journal of River Basin Management**, v. 11, n. 4, p. 389–399, 2013. DOI. 10.1080/15715124.2013.819006.

CAVALCANTI, D. L. O. **Estudo Comparativo de Métodos de Estimação de Vazões Máximas de Projeto para Grandes Bacias Hidrográficas**. 2014. 226 f. Dissertação (Mestrado em Ciências: Engenharia Hidráulica e Saneamento) – Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos, Programa de Pós Graduação, Departamento de Hidráulica e Saneamento, São Carlos, 2014.

CHAGAS, V. B. P.; CHAFFE, P. L. B. Não Estacionariedade é Inevitável! Causas das Recentes Mudanças de Vazões no Brasil. *In*: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 23, 2019, Foz do Iguaçu. **Anais...** Foz do Iguaçu: ABRH, 2019. Disponível em: <<https://files.abrhidro.org.br/Eventos/Trabalhos/107/XXIII-SBRH0290-1-20190423-184803.pdf>>. Acesso em: 10 jun. 2024.

CHOU, S. C.; LYRA, A.; MOURÃO, C.; DERECZYNSKI, C.; PILOTTO, I.; GOMES, J.; BUSTAMANTE, J.; TAVARES, P.; SILVA, A.; RODRIGUES, D.; CAMPOS, D.; CHAGAS, D.; SUEIRO, G.; SIQUEIRA, G.; NOBRE, P.; MARENGO, J. Evaluation of the Eta Simulations Nested in Three Global Climate Models. **American Journal of Climate Change**, v. 03, n. 05, p. 438–454, 2014. DOI. 10.4236/ajcc.2014.35039.

DANKERS, R.; ARNELL, N. W.; CLARK, D. B.; FALLOON, P. D.; FEKETE, B. M.; GOSLING, S. N.; HEINKE, J.; KIM, H.; MASAKI, Y.; SATOH, Y.; STACKE, T.; WADA, Y.; WISSER, D. First look at changes in flood hazard in the Inter-Sectoral Impact Model Intercomparison Project ensemble. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 111, n. 9, p. 3257–3261, 2014. DOI. 10.1073/pnas.1302078110.

DETZEL, D. H. M. **Modelagem de séries hidrológicas**: uma abordagem de múltiplas escalas temporais. 2015. 214 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental) – Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental, Curitiba, 2015.

DETZEL, D. H. M.; BESSA, M. R.; VALLEJOS, C. A. V.; SANTOS, A. B.; THOMSEN, L. S.; MINE, M. R. M.; BLOOT, M. L.; ESTRÓCIO, J. P. Estacionariedade das Afluências às Usinas Hidrelétricas Brasileiras. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 16, n. 3, p. 95-111, 2011.

DONNELLY, C.; GREUELL, W.; ANDERSSON, J.; GERTEN, D.; PISACANE, G.; ROUDIER, P.; LUDWIG, F. Impacts of climate change on European hydrology at 1.5, 2 and 3 degrees mean global warming above preindustrial level. **Climatic Change**, v. 143, n. 1–2, p. 13–26, 2017. DOI. 10.1007/s10584-017-1971-7.

DOTTORI, F.; SZEWCZYK, W.; CISCAR, J. C.; ZHAO, F.; ALFIERI, L.; HIRABAYASHI, Y.; BIANCHI, A.; MONGELLI, I.; FRIELER, K.; BETTS, R. A.; FEYEN, L. Increased human and economic losses from river flooding with anthropogenic warming. **Nature Climate Change**, v. 8, n. 9, p. 781–786, 2018. DOI. 10.1038/s41558-018-0257-z.

ELETROBRÁS. **Critérios de Projeto Civil de Usinas Hidrelétricas**. Rio de Janeiro: Centrais Elétricas Brasileiras S.A., 2003.

ELETROBRÁS. **Guia para Cálculo de Cheia de Projeto de Vertedores**. Rio de Janeiro: Centrais Elétricas Brasileiras S.A., 1987.

ESPINOSA, H.; GRANEMANN, A.; SCHETINGER, L. Estacionariedade de Séries de Vazão e Precipitação no Extremo Oeste Catarinense. *In*: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 22., 2017, Florianópolis. **Anais...** Florianópolis. ABRH, 2017. Disponível em: < <https://anais.abrhydro.org.br/job.php?Job=2177> >. Acesso em: 10 jun. 2024.

FEARNSIDE, P. **Destrução e Conservação da Floresta Amazônica**. Manaus: Editora do INPA, 2022.

FRANÇOIS, B.; SCHLEF, K. E.; WI, S.; BROWN, C. Design Considerations for Riverine Floods in a Changing Climate – A Review. **Journal of Hydrology**, v. 574. p. 557-573, 2019. DOI. 10.1016/j.jhydrol.2019.04.068.

GAO, Y.; XIA, J.; CHEN, X.; ZOU, L.; HUANG, J.; YU, J. Analysis of the Nonstationarity Characteristics and Future Trends of Flood Extremes in the Dongting Lake Basin. **Journal of Hydrology: Regional Studies**, n. 44, 2022. DOI. 10.1016/j.ejrh.2022.101217.

GUAN, X.; VOROGUSHYN, S.; APEL, H.; MERZ, B. Assessing compound pluvial-fluvial flooding: Research status and ways forward. **Water Security**, v. 19, p. 100136, 2023. DOI. 10.1016/j.wasec.2023.100136.

HIRABAYASHI, Y.; MAHENDRAN, R.; KOIRALA, S.; KONOSHIMA, L.; YAMAZAKI, D.; WATANABE, S.; KIM, H.; KANAE, S. Global flood risk under climate change. **Nature Climate Change**, v. 3, n. 9, p. 816–821, 2013. DOI. 10.1038/nclimate1911.

HOLTHUIJZEN, M.; BECKAGE, B.; CLEMINS, P. J.; HIGDON, D.; WINTER, J. M. Robust bias-correction of precipitation extremes using a novel hybrid empirical quantile-mapping method: Advantages of a linear correction for extremes. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 149, p. 863–882. 2022. DOI 10.1007/s00704-022-04035-2.

HUANG, S.; HATTERMANN, F. F.; KRYSANOVA, V.; BRONSTERT, A. Projections of climate change impacts on river flood conditions in Germany by combining three different RCMs with a regional eco-hydrological model. **Climatic Change**, v. 116, n. 3–4, p. 631–663, 2013. DOI: 10.1007/s10584-012-0586-2.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). **Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation**. A Special Report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, USA. p. 582, 2012.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). **Climate Change 2021: The Physical Science Basis**. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, USA. p. 2391, 2021. DOI. 10.1017/9781009157896.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). **Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability**. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, USA. p. 3056, 2022. DOI. 10.1017/9781009325844.

ISENSEE, L. J.; PINHEIRO, A.; DETZEL, D. H. M. Dam hydrological risk and the desing flood under non-stationary conditions. **Water Resources Management**, v. 35, p. 1499-1512, 2021.

JONGMAN, B.; WARD, P. J.; AERTS, J. C. J. H. Global exposure to river and coastal flooding: Long term trends and changes. **Global Environmental Change**, v. 22, n. 4, p. 823–835, 2012. DOI. 10.1016/j.gloenvcha.2012.07.004.

KAY, A. L.; JONES, D. A. Transient changes in flood frequency and timing in Britain under potential projections of climate change. **International Journal of Climatology**, v. 32, n. 4, p. 489–502, 2012. DOI. 10.1002/joc.2288.

KHARIN, V.; ZWIERS, F.; ZHANG, X.; WEHNER, M. Changes in temperature and precipitation extremes in the CMIP5 ensemble. **Climatic Change**, v. 119, p. 345–357, jul. 2013. DOI. <http://dx.doi.org/10.1007/s10584-013-0705-8>.

LIMA, J. **Efeitos das mudanças climáticas na geração de energia elétrica**. AES Tietê São Paulo – SP, 360 p., 2014.

LINS, H. F.; COHN, T. A. Stationarity: Wanted dead or alive? **Journal of the American Water Resources Association (JAWRA)**, v. 47, n. 3, p. 475-488, 2011. DOI: 10.1111/j.1752-1688.2011.00542.x.

MAHATO, P. K.; SINGH, D.; BHARATI, B.; GAGNON, A. S.; SINGH, B. B.; BREMA, J. Assessing the impacts of human interventions and climate change on fluvial flooding using CMIP6 data and GIS-based hydrologic and hydraulic models. **Geocarto**

International, v. 37, n. 26, p. 11483–11508, 2022. DOI. 10.1080/10106049.2022.2060311.

MARENGO, J. A. O futuro clima do Brasil. **Revista USP**, n. 103, p. 25, 2014.

MELCHIOR, J. V. **Vazões de projeto sob condições não estacionárias**: uma aplicação para usinas hidrelétricas no Brasil. 2022. 154 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental) – Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental, Curitiba, 2022.

MILLARD, S. P.; KOWARIK, A. **EnvStats**: Package for environmental statistics, including US EPA guidance. 2024. R package version 3.0.0, Disponível em: <<https://cran.r-project.org/web/packages/EnvStats/index.html>>. Acesso em: 10 jun. 2024.

MILLÉO, C.; PLOSZAI, R.; MINE, M. R. M. Análise de tendências na série histórica de precipitações em Curitiba. *In*: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 21., 2015, Brasília. **Anais...** Brasília. ABRH, 2015. Disponível em: <<https://files.abrhidro.org.br/Eventos/Trabalhos/4/PAP019316.pdf>>. Acesso em: 10 jun. 2024.

MILLY, P. C. D.; BETANCOURT, J.; FALKENMARK, M.; HISRCH, R. M.; KUNDZEWICZ Z. W.; LETTENMAIER D. P.; STOUFFER, R. J. Stationarity is dead: Whither water management? **Science**, v. 319, n. 5863, p. 573-574, 2008. DOI. 10.1126/science.1151915.

MOSS, R. H.; EDMONDS, J. A.; HIBBARD, K. A.; MANNING, M. R.; ROSE, S. K.; VAN VUUREN, D. P.; CARTER, T. R.; EMORI, S.; KAINUMA, M.; KRAM, T.; MEEHL, G. A.; MITCHELL, J. F.; NAKICENOVIC, N.; RIAHI, K.; SMITH, S. J.; STOUFFER, R. J.; THOMSON, A. M.; WEYANT, J. P.; WILBANKS, T. J. The next generation of scenarios for climate change research and assessment. **Nature**, v. 463, n. 7282, p. 747–756, 2010. DOI. 10.1038/nature08823.

MOURA, C. N.; MINE, M. R. M.; KAVISKI, E. Incertezas e impactos de mudanças climáticas nos recursos hídricos. *In*: Congresso Latinoamericano de Hidráulica-Hidrologia Superficial e Subterrânea, 28., 2018, Buenos Aires. **Anais...** Buenos Aires. LADHI, 2018.

NAGHETTINI, M.; PINTO, E. **Hidrologia Estatística**. Belo Horizonte: CPRM, 2007.

NASHWAN, M. S.; ISMAIL, T.; AHMED, K. Non-stationary analysis of extreme rainfall in Peninsular Malaysia. **Journal of Sustainability Science and Management**, v. 14, n. 3, p. 17–34, 2019.

OBEYSEKERA, J.; SALAS, J. D. Quantifying the uncertainty of design floods under nonstationary conditions. **Journal of Hydrologic Engineering**, v. 19, n. 7, p. 1438–1446, 2014. DOI. 10.1061/(asce)he.1943-5584.0000931.

OKAZAKI, A.; YEH, P. J. F.; YOSHIMURA, K.; WATANABE, M.; KIMOTO, M.; OKI, T. Changes in flood risk under global warming estimated using MIROC5 and the discharge probability index. **Journal of the Meteorological Society of Japan**, v. 90, n. 4, p. 509–524, 2012. DOI. 10.2151/jmsj.2012-405.

ONS. **O sistema em números**. 2024. Disponível em: <<https://www.ons.org.br/paginas/sobre-o-sin/o-sistema-em-numeros>>. Acesso em: 10 jun. 2024.

ONS. **Revisão das séries de vazões naturais em bacias do Sistema Interligado Nacional**: Relatório Executivo. 2011. Disponível em: <https://www.ons.org.br/sites/multimidia/Documentos%20Compartilhados/vazoes_naturais/2011/2.html>. Acesso em: 10 jun. 2024.

PAIVA, R.; COLLISCHONN, W.; MIRANDA, P.; PETRY, I.; DORNELLES, F.; GOLDENFUM, J.; FAN, F.; RUHOFF, R.; FAGUNDES, H. **Crítérios hidrológicos para adaptação à mudança climática**: Chuvas e cheias extremas na Região Sul do Brasil. Nota Técnica. Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2024.

PATAKAMURI, S. K.; O'BRIEN, N. **modifiedmk**: Modified versions of Mann Kendall and Spearman's Rho trend tests. 2022. R package version 1.6, Disponível em: <<https://cran.r-project.org/web/packages/modifiedmk/index.html>>. Acesso em: 10 jun. 2024.

POHLERT, T. **trend**: Non-parametric trend tests and change-point detection. 2023. R package version 1.1.6, Disponível em: <<https://CRAN.R-project.org/package=trend>>. Acesso em: 10 jun. 2024.

R CORE TEAM. **R**: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. Disponível em: <<https://www.R-project.org/>>. Acesso em: 10 jun. 2024.

RAZAVI, S.; GOBER, P.; MAIER, H. R.; BROUWER, R.; WHEATER, H. (2020). Anthropocene flooding: Challenges for science and society. **Hydrological Processes**, v. 34, n. 8, p. 1996–2000, 2020. DOI. 10.1002/hyp.13723.

RAZMI A.; GOLIAN, S.; ZAHMATKESH, Z.; Non-stationary frequency analysis of extreme water level: Application of annual maximum series and peak-over threshold approaches. **Water Resources Management**, v. 31, n. 7, p. 2065-2083, 2017. DOI. 10.1007/s11269-017-1619-4.

ROJAS, R.; FEYEN, L.; WATKISS, P. Climate change and river floods in the European Union: Socio-economic consequences and the costs and benefits of adaptation. **Global Environmental Change**, v. 23, n. 6, p. 1737–1751, 2013. DOI. 10.1016/j.gloenvcha.2013.08.006.

SERAGO, J. M.; VOGEL, R. M. Parsimonious nonstationary flood frequency analysis. **Advances in Water Resources**, v. 112, p. 1-16, 2018.

SOUZA, S. A.; REIS, D. S. Trend detection in annual streamflow extremes in Brazil. **Water**, Switzerland, v. 14, n. 11., 2022. DOI. 10.3390/w14111805.

SRAJ, M.; VIGLIONE, A.; PARAJKA, J.; BLOSCHL, G. The influence of non-stationarity in extreme hydrological events on flood frequency estimation. **Journal of Hydrology and Hydromechanics**, v. 64, n. 4, p. 426-437, 2016. DOI. 10.1515/johh-2016-0032.

SUN, Q.; ZHANG, X.; ZWIERS, F.; WESTRA, S.; ALEXANDER, L. V. A global, continental, and regional analysis of changes in extreme precipitation. **Journal of Climate**, v. 34, n. 1, p. 243–258, 2021. DOI. 10.1175/jcli-d-19-0892.1.

TABARI, H. Climate change impact on flood and extreme precipitation increases with water availability. **Scientific Reports**, v. 10, n. 1, 2020. DOI. 10.1038/s41598-020-70816-2.

TABARI, H. Extreme value analysis dilemma for climate change impact assessment on global flood and extreme precipitation. **Journal of Hydrology**, v. 593, 2021. DOI. 10.1016/j.jhydrol.2020.125932.

TEBALDI, C. *et al.* Climate model projections from the Scenario Model Intercomparison Project (ScenarioMIP) of CMIP6. **Earth System Dynamics**, v. 12, n. 1, p. 253–293, 2021. DOI:10.5194/esd-12-253-2021.

THOBER, S.; KUMAR, R.; WANDERS, N.; MARX, A.; PAN, M.; RAKOVEC, O.; SAMANIEGO, L.; SHEFFIELD, J.; WOOD, E. F.; ZINK, M. Multi-model ensemble projections of European river floods and high flows at 1.5, 2 and 3 degrees global warming. **Environmental Research Letters**, v. 13, n. 1, 2018. DOI: 10.1088/1748-9326/aa9e35.

TRENBERTH, K. Changes in precipitation with climate change. **Climate Research**, v. 47, n. 1–2, p. 123–138, 2011. DOI. 10.3354/cr00953.

ULIANA, E. M.; SILVA, D. D.; ULIANA, E. M.; RODRIGUES, B. S.; CORRÊDO, L. P. Análise de tendência em séries históricas de vazão e precipitação: uso de teste estatístico não paramétrico. **Revista Ambiente e Água**, v. 10, n. 1, p. 82-88, 2015. DOI.10.4136/1980-993X.

VEIJALAINEN, N.; LOTSARI, E.; ALHO, P.; VEHVILÄINEN, B.; KÄYHKÖ, J. National scale assessment of climate change impacts on flooding in Finland. **Journal of Hydrology**, v. 391, n. 3–4, p. 333–350, 2010. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2010.07.035.

VILLARINI, G.; SMITH, J. A.; BAECK, M. L.; KRAJEWSKI, W. F. Examining flood frequency distributions in the Midwest U.S. **Journal of the American Water Resources Association (JAWRA)**, v. 47, n. 3, p.447–463, 2011. DOI. 10.1111/j.1752-1688.2011.00540.x.

WANG, M.; FU, X.; ZHANG, D.; CHEN, F.; LIU, M.; ZHOU, S.; SU, J.; TAN, S. K. Assessing urban flooding risk in response to climate change and urbanization based

on shared socio-economic pathways. **Science of the Total Environment**, v. 880, p. 163470, 2023. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2023.163470.

WASKO, C.; NATHAN, R.; STEIN, L.; O'SHEA, D. Evidence of shorter more extreme rainfalls and increased flood variability under climate change. **Journal of Hydrology**, v. 603, 2021. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2021.126994.

WASKO, C.; WESTRA, S.; NATHAN, R.; ORR, H. G.; VILLARINI, G.; VILLALOBOS HERRERA, R.; FOWLER, H. J. Incorporating climate change in flood estimation guidance. **Phil. Trans. R. Soc. A**. 379, 2021b. DOI: 10.1098/rsta.2019.0548.

XAVIER, A. C. F.; RUDKE, A. P.; FUJITA, T.; BLAIN, G. C.; MORAIS, M. V. B. DE; ALMEIDA, D. S. DE; RAFEE, S. A. A.; MARTINS, L. D.; SOUZA, R. A. F. DE; FREITAS, E. D. DE; MARTINS, J. A. Stationary and non-stationary detection of extreme precipitation events and trends of average precipitation from 1980 to 2010 in the Paraná River basin, Brazil. **International Journal of Climatology**, v. 40, n. 2, p. 1197–1212, 2020. DOI: 10.1002/joc.6265.

XU, X.; WANG, Y. C.; KALCIC, M.; MUENICH, R. L.; YANG, Y. C. E.; SCAVIA, D. Evaluating the impact of climate change on fluvial flood risk in a mixed-use watershed. **Environmental Modelling and Software**, v. 122, 2017. DOI: 10.1016/j.envsoft.2017.07.013.

YUE, S.; WANG, C. Y. Applicability of prewhitening to eliminate the influence of serial correlation on the Mann-Kendall test. **Water Resources Research**, v. 38, n. 6, 4-7, 2002. DOI: 10.1029/2001wr000861.

APÊNDICE 1 – INFORMAÇÕES BÁSICAS DAS USINAS HIDRELÉTRICAS SELECIONADAS PARA AVALIAÇÃO DA CONDIÇÃO DE ESTACIONARIEDADE

Tabela 1 – Informações básicas das usinas hidrelétricas.

Cód. UHE	Nome	Rio	Subsistema	Longitude	Latitude	Quant. Anos
284	14 de Julho	Taquari-Antas	Sul	-51,6750	-29,0650	82
18	A. Vermelha	Grande	Sudeste	-50,3460	-19,8510	91
47	A.A. Laydner	Paranapanema	Sudeste	-49,2300	-23,2090	91
183	A.Dias+S.Car	Piracicaba	Sudeste	-42,8500	-19,6470	87
238	A.S. Lima	Tietê	Sudeste	-48,7530	-22,1530	91
16	A.S.Oliveira	Pardo	Sudeste	-47,0090	-21,6250	84
148	Aimorés	Doce	Sudeste	-41,0240	-19,4980	84
129	Anta	Paraíba do Sul	Sudeste	-42,9993	-22,0323	91
248	B. Coqueiros	Claro	Sudeste	-51,0030	-18,7220	50
190	B. Esperança	Parnaíba	Nordeste	-43,5670	-6,7480	56
141	Baguari	Doce	Sudeste	-42,1230	-19,0220	56
81	Baixo Iguaçu	Iguaçu	Sul	-53,6710	-25,5030	65
269	Balbina	Uatumã	Norte	-59,4730	-1,9160	34
237	Barra Bonita	Tietê	Sudeste	-48,5340	-22,5190	91
135	Barra Braúna	Pomba	Sudeste	-42,4046	-21,4501	88
215	Barra Grande	Pelotas	Sul	-51,1930	-27,7770	81
22	Batalha	São Marcos	Sudeste	-47,4830	-17,3500	53
118	Billings	Tietê e Tributários	Sudeste	-46,4621	-23,8619	91
204	Cach. Caldeirão	Araguari	Norte	-51,2920	0,8530	47
32	Cach. Dourada	Paranaíba	Sudeste	-49,4930	-18,5030	49
14	Caconde	Pardo	Sudeste	-46,6240	-21,5770	85
247	Caçu	Claro	Sudeste	-51,1500	-18,5290	50
1	Camargos	Grande	Sudeste	-44,6160	-21,3260	90
216	Campos Novos	Canoas	Sul	-51,3170	-27,6020	81
191	Cana Brava	Tocantins	Sudeste	-48,1430	-13,3990	60
149	Candongá	Doce	Sudeste	-42,8550	-20,2060	81
52	Canoas I	Paranapanema	Sudeste	-50,5170	-22,9410	91
51	Canoas II	Paranapanema	Sudeste	-50,2500	-22,9360	91
207	Capim Branco 1	Araguari	Sudeste	-48,1470	-18,7900	73
28	Capim Branco 2	Araguari	Sudeste	-48,4350	-18,6600	73
61	Capivara	Paranapanema	Sudeste	-51,3600	-22,6580	91
98	Castro Alves	Taquari-Antas	Sul	-51,3790	-29,0080	82
49	Chavantes	Paranapanema	Sudeste	-49,7310	-23,1290	91
280	Coaracy Nun.	Araguari	Norte	-51,2590	0,9030	47
228	Colider	Teles Pires	Sudeste	-55,7660	-10,9850	47
176	Compl. P. Afonso Moxotó	São Francisco	Nordeste	-38,2080	-9,3930	91
209	Corumbá I	Corumbá	Sudeste	-48,5310	-17,9890	49
23	Corumbá III	Corumbá	Sudeste	-47,9420	-16,7860	49
205	Corumbá IV	Corumbá	Sudeste	-48,1880	-16,3210	49
277	Curuá-Uná	Curuá-Uná	Norte	-54,2990	-2,8120	44

Cód. UHE	Nome	Rio	Subsistema	Longitude	Latitude	Quant. Anos
114	D. Francisca	Jacuí	Sul	-53,2860	-29,4500	83
291	Dardanelos	Aripuanã	Sudeste	-59,4640	-10,1630	42
15	E. da Cunha	Pardo	Sudeste	-46,9490	-21,6030	84
24	Emborcação	Paranaíba	Sudeste	-47,9860	-18,4520	53
110	Ernestina	Jacuí	Sul	-52,5450	-28,5560	82
99	Espora	Corrente	Sudeste	-51,8660	-18,6760	50
8	Estreito	Grande	Sudeste	-47,2790	-20,1510	91
271	Estreito Tocantins	Tocantins	Norte	-47,4590	-6,5870	61
297	Ferreira Gomes	Araguari	Norte	-51,2000	0,8520	47
94	Foz Chapecó	Uruguai	Sul	-53,0400	-27,1420	82
261	Foz do Rio Claro	Claro	Sudeste	-50,6460	-19,1180	50
72	Fundão	Jordão	Sul	-51,9980	-25,7090	72
123	Funil	Paraíba do Sul	Sudeste	-44,5670	-22,5300	91
211	Funil-Grande	Grande	Sudeste	-45,0370	-21,1440	91
6	Furnas	Grande	Sudeste	-46,3290	-20,6470	91
74	G. B. Munhoz	Iguaçu	Sul	-51,6500	-26,0830	53
115	G. P. Souza	Capivari	Sul	-48,8740	-25,1390	50
89	Garibaldi	Canoas	Sul	-50,9880	-27,6220	81
296	Guaporé	Guaporé	Sudeste	-58,9650	-15,1240	50
117	Guarapiranga	Tietê e Tributários	Sudeste	-46,7280	-23,6710	91
262	Guilman-Amorim	Piracicaba	Sudeste	-42,9600	-19,7080	87
34	I. Solteira	Paraná	Sudeste	-51,3640	-20,3830	91
239	Ibitinga	Tietê	Sudeste	-48,9910	-21,7590	53
10	Igarapava	Grande	Sudeste	-47,7500	-19,9830	91
130	Ilha Pombos	Paraíba do Sul	Sudeste	-42,5830	-21,8500	91
255	Irapé	Jequitinhonha	Sudeste	-42,5750	-16,7380	76
92	Itá	Uruguai	Sul	-52,3821	-27,2770	82
266	Itaipu	Iguaçu	Sul	-54,5930	-25,4270	91
172	Itaparica	São Francisco	Nordeste	-38,3130	-9,1437	91
188	Itapebi	Jequitinhonha	Nordeste	-39,5210	-15,9400	84
113	Itaúba	Jacuí	Sul	-53,2360	-29,2590	83
252	Itiquira II	Itiquira	Sudeste	-54,8310	-17,0910	52
31	Itumbiara	Paranaíba	Sudeste	-49,1160	-18,4210	49
112	Jacuí	Jacuí	Sul	-53,2090	-29,0730	83
9	Jaguara	Grande	Sudeste	-47,4340	-20,0230	91
120	Jaguari	Jaguari	Sudeste	-46,0280	-23,1950	86
295	Jauru	Jauru	Sudeste	-58,7280	-15,2360	42
285	Jirau	Madeira	Sudeste	-64,7340	-9,3310	55
73	Jordão	Jordão	Sul	-52,0890	-25,7580	72
245	Jupia	Paraná	Sudeste	-51,6270	-20,7760	91
50	L. N. Garcez	Paranapanema	Sudeste	-50,0000	-22,9040	91
273	Lajeado	Tocantins	Norte	-48,3710	-9,7570	61
202	Lajes	Ribeirão das Lajes	Sudeste	-43,8810	-22,7025	91
7	M. de Moraes	Grande	Sudeste	-47,0660	-20,2880	91
217	Machadinho	Uruguai	Sul	-51,7900	-27,5280	82
278	Manso	Manso	Sudeste	-55,7860	-14,8740	40

Cód. UHE	Nome	Rio	Subsistema	Longitude	Latitude	Quant. Anos
17	Marimbondo	Grande	Sudeste	-49,1970	-20,3010	91
144	Mascarenhas	Doce	Sudeste	-40,9180	-19,5000	84
57	Mauá	Tibagi	Sul	-50,7060	-24,0620	48
206	Miranda	Araguari	Sudeste	-48,0410	-18,9120	73
220	Monjolinho	Passo Fundo	Sul	-52,7300	-27,3460	73
97	Monte Claro	Taquari-Antas	Sul	-51,5210	-29,0300	82
173	Moxotó	São Francisco	Nordeste	-38,2085	-9,3581	91
242	N. Avanhandava	Tietê	Sudeste	-50,2010	-21,1190	53
25	Nova Ponte	Araguari	Sudeste	-47,6940	-19,1330	73
249	Ourinhos	Paranapanema	Sudeste	-49,8380	-23,0680	91
175	P. Afonso	São Francisco	Nordeste	-38,2077	-9,4156	91
254	P. Cavalo	Paraguaçu	Nordeste	-38,9990	-12,5850	62
12	P. Colômbia	Grande	Sudeste	-48,5720	-20,1240	91
263	P. Estrela	Santo Antônio	Sudeste	-42,6590	-19,1170	56
246	P. Primavera	Paraná	Sudeste	-52,9560	-22,4780	91
121	Paraibuna	Paraíba do Sul	Sudeste	-45,6010	-23,4100	91
93	Passo Fundo	Passo Fundo	Sul	-52,7330	-27,5500	73
111	Passo Real	Jacuí	Sul	-53,1900	-29,0170	83
103	Passo São João	Ijuí	Sul	-55,0478	-28,1390	80
257	Peixe Angical	Tocantins	Norte	-48,3820	-12,2390	61
197	Picada	do Peixe	Sudeste	-43,5410	-21,8850	91
288	Pimental	Xingú	Norte	-51,7750	-3,1264	52
48	Piraju	Paranapanema	Sudeste	-49,3800	-23,1540	91
281	Ponte Pedra	Correntes	Sudeste	-54,8270	-17,6080	73
240	Promissão	Tietê	Sudeste	-49,7830	-21,2960	53
286	Quebra Queixo	Chapecó	Sul	-52,5330	-26,6500	65
158	Queimado	Preto	Sudeste	-47,3220	-16,2090	56
155	Retiro Baixo	Paraopeba	Sudeste	-44,7820	-18,8940	35
145	Rondon II	Comemoração	Sudeste	-60,6970	-11,9970	39
196	Rosal	Itabapoana	Sudeste	-41,7000	-20,9170	91
63	Rosana	Paranapanema	Sudeste	-52,8690	-22,6000	91
294	Salto	Verde	Sudeste	-51,1690	-18,8080	50
222	Salto Caxias	Iguaçu	Sul	-53,4980	-25,5430	65
134	Salto Grande	Santo Antônio	Sudeste	-42,7190	-19,1160	56
78	Salto Osório	Iguaçu	Sul	-53,0330	-25,5330	81
101	Salto Pilão	Itajaí-Açu	Sul	-49,5000	-27,1170	81
77	Salto Santiago	Iguaçu	Sul	-52,6170	-25,6500	81
241	Salto Verdinho	Verde	Sudeste	-50,7670	-19,1460	50
279	Samuel	Jamari	Sudeste	-63,4540	-8,7520	52
122	Santa Branca	Paraíba do Sul	Sudeste	-45,8710	-23,3730	91
125	Santa Cecília	Paraíba do Sul	Sudeste	-43,8387	-22,4814	91
283	Santa Clara MG	Mucuri	Sudeste	-40,3110	-17,8510	79
71	Santa Clara PR	Jordão	Sul	-51,9540	-25,6480	72
203	Santana	Santana	Sudeste	-46,8106	-20,8129	91
290	Santo Ant Jari	Jari	Norte	-52,5170	-0,6500	42
287	Santo Antônio (Madeira)	Madeira	Sudeste	-63,9490	-8,8010	55

Cód. UHE	Nome	Rio	Subsistema	Longitude	Latitude	Quant. Anos
154	São Domingos	Verde	Sudeste	-53,1740	-20,0830	46
102	São José	Ijuí	Sul	-54,8250	-28,1800	80
230	São Manoel	Teles Pires	Sudeste	-57,0520	-9,1900	41
88	São Roque	Canoas	Sul	-50,8046	-27,4978	81
253	São Salvador	Tocantins	Norte	-48,2390	-12,8100	61
33	São Simão	Paranaíba	Sudeste	-50,4990	-19,0180	62
76	Segredo	Iguaçu	Sul	-52,1130	-25,7930	54
251	Serra Facão	São Marcos	Sudeste	-47,6670	-18,0670	53
270	Serra Mesa	Tocantins	Sudeste	-48,3060	-13,8290	60
227	Sinop	Teles Pires	Sudeste	-55,4530	-11,2670	47
169	Sobradinho	São Francisco	Nordeste	-40,8230	-9,4160	91
198	Sobragi	Paraibuna	Sudeste	-43,3700	-21,9400	91
213	Suíça	Santa Maria da Vitória	Sudeste	-40,5770	-20,0832	72
62	Taquaruçu	Parapanema	Sudeste	-52,0000	-22,5420	91
229	Teles Pires	Teles Pires	Sudeste	-56,7770	-9,3410	41
243	Três Irmãos	Tietê	Sudeste	-51,3000	-20,6690	53
156	Três Marias	São Francisco	Sudeste	-45,2630	-18,2140	91
275	Tucuruí	Tocantins	Norte	-49,6520	-3,8320	53
11	Volta Grande	Grande	Sudeste	-48,2210	-20,0290	91
178	Xingó	São Francisco	Nordeste	-37,7970	-9,6240	91

APÊNDICE 2 – ESTATÍSTICA DO TESTE MK-TFPW PARA IDENTIFICAÇÃO DAS SÉRIES AFLUENTES COM COMPORTAMENTO NÃO ESTACIONÁRIO

Tabela 2 - Resultado da estatística do teste MK-TFPW ($\alpha = 5\%$).

Nome (Código)	p-valor (MK-TFPW)	Nome (Código)	p-valor (MK-TFPW)
14 de Julho (284)	0,0026	Irapé (255)	0,0006
A.A. Laydner (47)	0,0004	Itaipu (266)	0,0000
A.Dias+S.Car (183)	0,0107	Itaparica (172)	0,0090
A.S. Lima (238)	0,0002	Itapebi (188)	0,0004
A.S.Oliveira (16)	0,0221	Itaúba (113)	0,0453
B. Coqueiros (248)	0,0054	Itumbiara (31)	0,0092
Baixo Iguaçú (81)	0,0076	Jauru (295)	0,0000
Barra Bonita (237)	0,0000	L. N. Garcez (50)	0,0003
Barra Grande (215)	0,0000	Lajeado (273)	0,0126
Billings (118)	0,0000	Machadinho (217)	0,0236
Cach. Caldeirão (204)	0,0468	Monjolinho (220)	0,0024
Cach. Dourada (32)	0,0048	Monte Claro (97)	0,0027
Caçu (247)	0,0121	Moxotó (173)	0,0156
Cana Brava (191)	0,0120	Ourinhos (249)	0,0001
Canoas I (52)	0,0005	P. Afonso (175)	0,0099
Canoas II (51)	0,0003	Passo Fundo (93)	0,0093
Capivara (61)	0,0107	Peixe Angical (257)	0,0244
Castro Alves (98)	0,0000	Piraju (48)	0,0010
Chavantes (49)	0,0000	Queimado (158)	0,0000
Coaracy Nun. (280)	0,0468	Rondon II (145)	0,0000
Compl. P. Af. Moxotó (176)	0,0156	Salto Caxias (222)	0,0087
Corumbá III (23)	0,0269	Salto Osório (78)	0,0104
Curuá-Uná (277)	0,0265	Salto Santiago (77)	0,0018
D. Francisca (114)	0,0071	Salto Verdinho (241)	0,0063
E. da Cunha (15)	0,0203	Samuel (279)	0,0000
Emborcação (24)	0,0154	Santo Ant. Jari (290)	0,0213
Ernestina (110)	0,0000	São Domingos (154)	0,0493
Espora (99)	0,0006	São Roque (88)	0,0366
Estreito Tocantins (271)	0,0141	São Salvador (253)	0,0296
Ferreira Gomes (297)	0,0408	São Simão (33)	0,0160
Foz Chapecó (94)	0,0226	Serra Mesa (270)	0,0376
Foz do Rio Claro (261)	0,0035	Sobradinho (169)	0,0067
Guaporé (296)	0,0001	Sobragi (198)	0,0112
Guarapiranga (117)	0,0070	Taquaruçu (62)	0,0266
Guilman-Amorim (262)	0,0199	Xingó (178)	0,0156

**APÊNDICE 3 – ESTATÍSTICA DO TESTE KS PARA AVALIAÇÃO DA
QUALIDADE DO AJUSTE DAS SÉRIES HIDROLÓGICAS COM A DISTRIBUIÇÃO
DE PROBABILIDADE GEV**

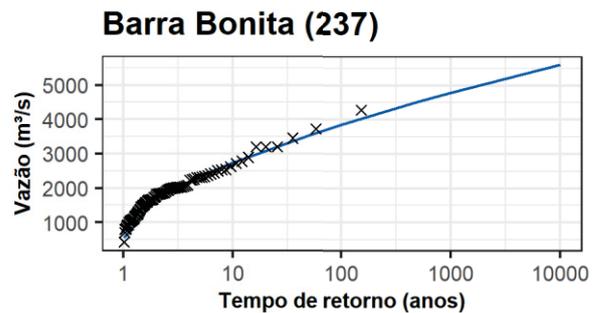
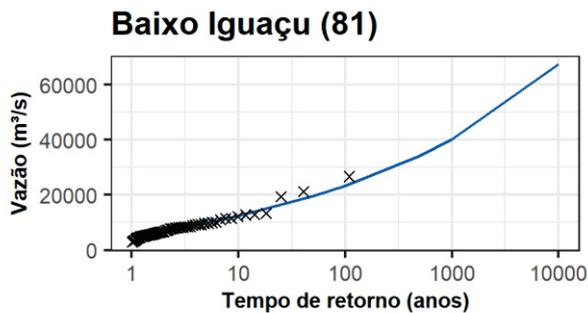
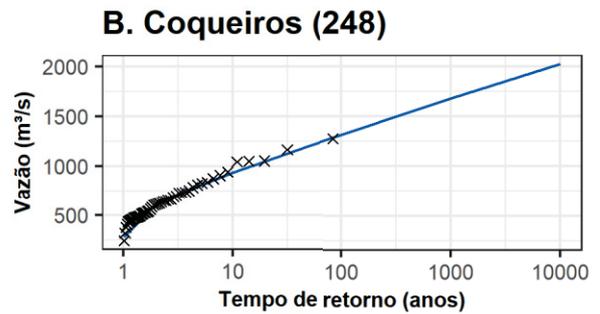
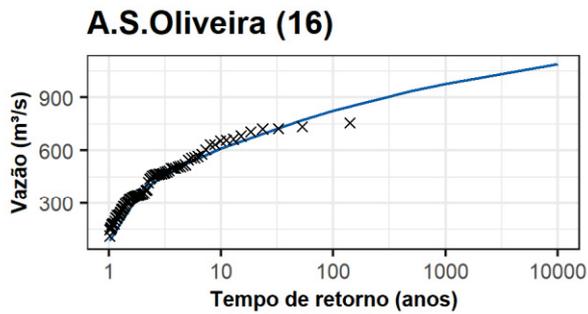
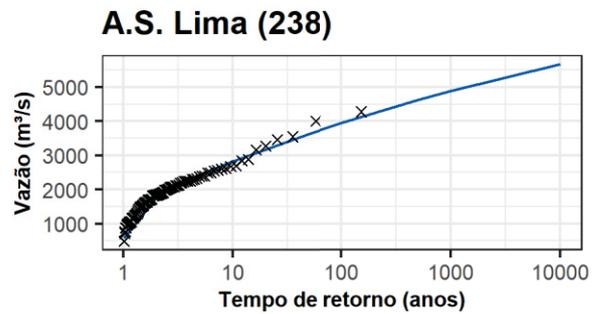
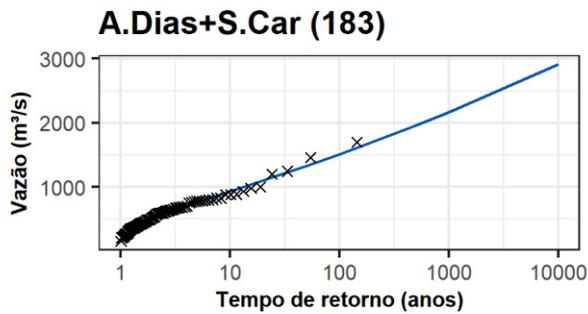
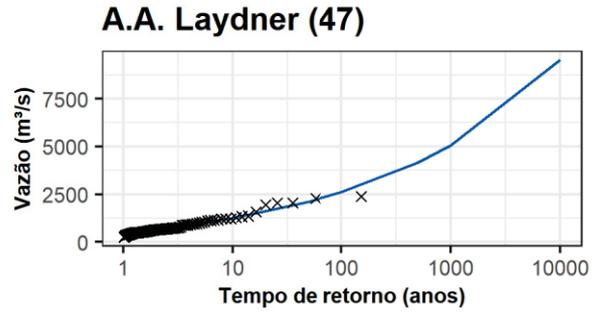
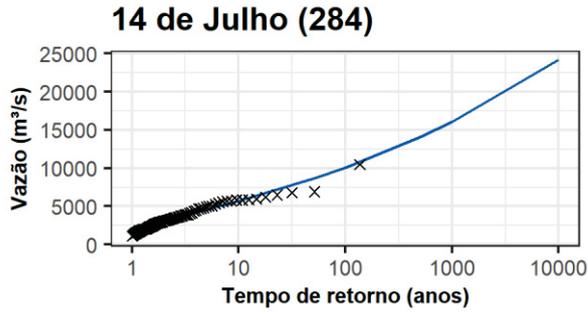
Tabela 3 - Resultado da estatística do teste KS ($\alpha = 5\%$) para avaliação da qualidade do ajuste das séries hidrológicas com a distribuição de probabilidade GEV.

Nome (Código)	Série HIS	p-valor (KS)		
		Série EQM	Série QAC	Série TRU
14 de Julho (284)	0,8792	0,6434	0,7239	0,8928
A.A. Laydner (47)	0,8905	0,4690	0,8242	0,5712
A.Dias+S.Car (183)	0,8221	0,9171	0,8889	0,9534
A.S. Lima (238)	0,7908	0,7174	0,7588	0,8255
A.S.Oliveira (16)	0,5053	0,4859	0,9347	0,6623
B. Coqueiros (248)	0,9657	0,2810	0,9851	-
Baixo Iguaçu (81)	0,9828	0,8511	0,8066	0,9143
Barra Bonita (237)	0,8826	0,7155	0,5535	0,8354
Barra Grande (215)	0,9993	0,5111	0,6942	0,6940
Billings (118)	0,9926	0,6861	0,9941	0,9211
Cach. Caldeirão (204)	0,4882	0,6891	0,7320	0,8083
Cach. Dourada (32)	0,9608	0,7065	0,9229	-
Caçu (247)	0,9955	0,0217	0,9898	-
Cana Brava (191)	0,9602	0,5194	0,7762	-
Canoas I (52)	0,7514	0,6091	0,8553	0,8584
Canoas II (51)	0,8685	0,6766	0,9135	0,9056
Capivara (61)	0,8638	0,6238	0,8654	0,8094
Castro Alves (98)	0,6617	0,4978	0,8115	0,8200
Chavantes (49)	0,9207	0,8694	0,9733	0,9545
Coaracy Nun. (280)	0,4963	0,6996	0,7431	0,8159
Compl. P. Af. Moxotó (176)	0,7738	0,5598	0,5985	-
Corumbá III (23)	0,9905	0,5621	0,6339	-
Curuá-Uná (277)	0,9881	0,8756	0,9949	-
D. Francisca (114)	0,7553	0,9848	0,8164	0,9996
E. da Cunha (15)	0,4514	0,4807	0,9195	0,7265
Emborcação (24)	0,5580	0,6018	0,8895	-
Ernestina (110)	0,8820	0,5744	0,6953	0,8815
Espora (99)	0,9761	0,2983	0,0000	-
Estreito Tocantins (271)	0,7718	0,9497	0,8741	-
Ferreira Gomes (297)	0,4476	0,7449	0,7841	0,8454
Foz Chapecó (94)	0,7565	0,1459	0,3633	0,4199
Foz do Rio Claro (261)	0,8585	0,2498	0,9909	-
Guaporé (296)	0,8813	0,8132	0,9424	0,8957
Guarapiranga (117)	0,8986	0,6835	0,9107	0,9699
Guilman-Amorim (262)	0,8993	0,9636	0,9581	0,9849
Irapé (255)	0,8997	0,9136	0,9881	-
Itaipu (266)	0,8405	0,5099	0,6563	0,7050
Itaparica (172)	0,8380	0,6362	0,7641	-
Itapebi (188)	0,9504	0,4260	0,7206	-
Itaúba (113)	0,9320	0,9129	0,7886	0,9896

Nome (Código)	Série HIS	p-valor (KS)		Série TRU
		Série EQM	Série QAC	
Itumbiara (31)	0,9786	0,6794	0,8909	-
Jauru (295)	0,6496	0,7532	0,9233	-
L. N. Garcez (50)	0,8602	0,8689	0,9572	0,9293
Lajeado (273)	0,7183	0,6312	0,9756	-
Machadinho (217)	0,5038	0,1560	0,4402	0,4505
Monjolinho (220)	0,9015	0,5600	0,6814	0,7488
Monte Claro (97)	0,8740	0,8288	0,7684	0,9690
Moxotó (173)	0,7738	0,5598	0,5985	-
Ourinhos (249)	0,8065	0,8424	0,9478	0,9195
P. Afonso (175)	0,8121	0,7669	0,7538	-
Passo Fundo (93)	0,6980	0,6656	0,4303	0,7191
Peixe Angical (257)	0,8481	0,6345	0,9922	-
Piraju (48)	0,8436	0,5981	0,7809	0,7034
Queimado (158)	0,8973	0,7623	0,8224	-
Rondon II (145)	0,6404	0,1689	0,4587	-
Salto Caxias (222)	0,9918	0,8703	0,8185	0,9258
Salto Osório (78)	0,8825	0,5665	0,9529	0,7840
Salto Santiago (77)	0,9555	0,7354	0,8919	0,8926
Salto Verdinho (241)	0,9935	0,8312	0,9734	-
Samuel (279)	0,9552	0,8864	0,9745	0,9796
Santo Ant Jari (290)	0,8832	0,5510	0,7405	-
São Domingos (154)	0,9598	0,9314	0,8578	-
São Roque (88)	0,9494	0,7306	0,5528	0,9119
São Salvador (253)	0,9583	0,8654	0,9616	-
São Simao (33)	0,6826	0,8470	0,6716	-
Serra Mesa (270)	0,6943	0,1682	0,6827	-
Sobradinho (169)	0,5097	0,2407	0,3573	-
Sobragi (198)	0,9682	0,7309	0,9168	0,9055
Taquaruçu (62)	0,9842	0,6637	0,9789	0,8148
Xingó (178)	0,7738	0,5596	0,5985	-

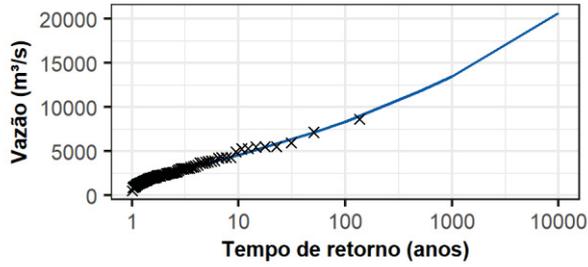
Nota: Séries truncadas indicadas com hífen possuem menos de 30 anos de dados e, portanto, não foram utilizadas para determinar a vazão de projeto.

APÊNDICE 4 – AJUSTE DE EXTREMOS DAS SÉRIES HIDROLÓGICAS

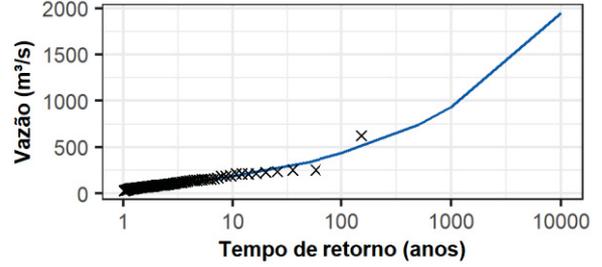


Legenda — Vazão de Projeto - Série Histórica × Vazão Máxima - Série Histórica

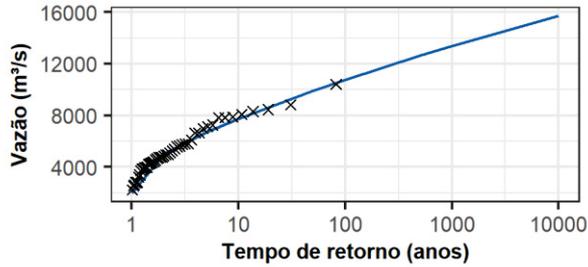
Barra Grande (215)



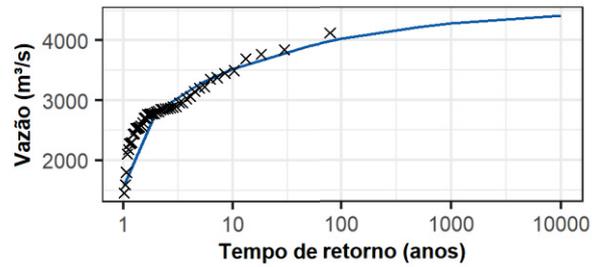
Billings (118)



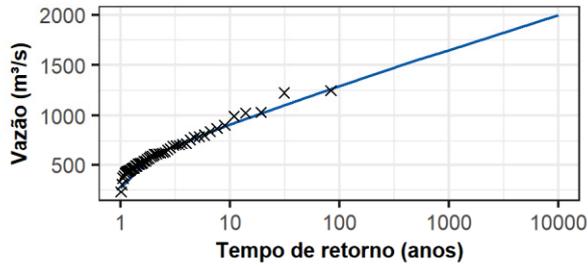
Cach. Dourada (32)



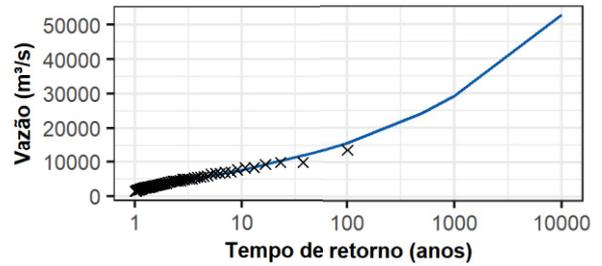
Cach. Caldeirão (204)



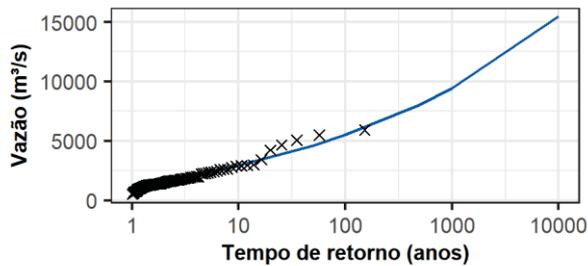
Caçú (247)



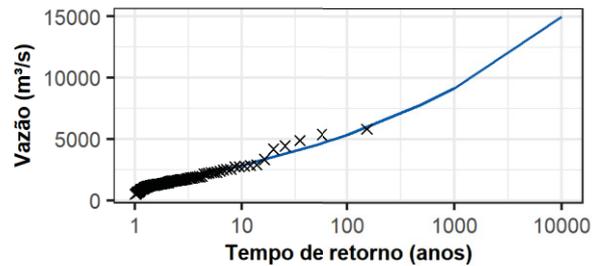
Cana Brava (191)



Canoas I (52)

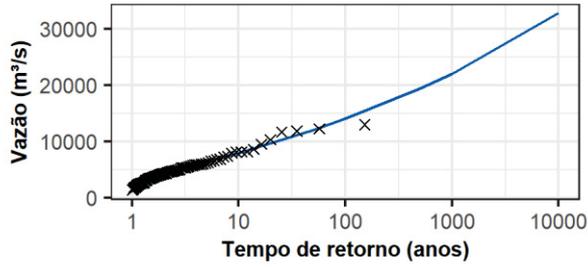


Canoas II (51)

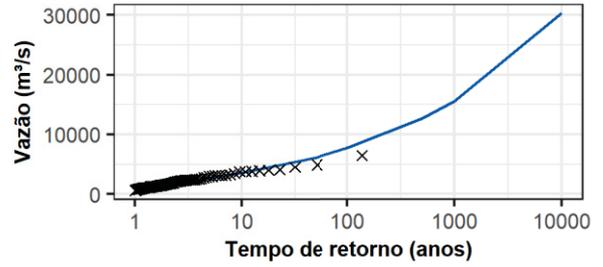


Legenda — Vazão de Projeto - Série Histórica × Vazão Máxima - Série Histórica

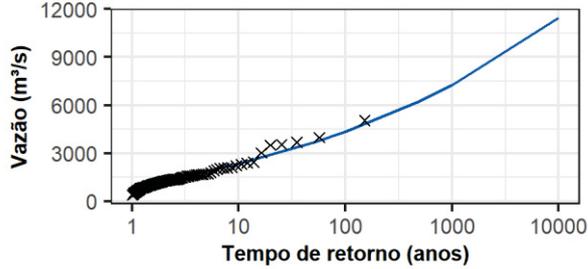
Capivara (61)



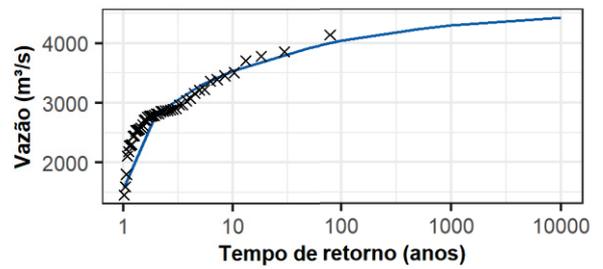
Castro Alves (98)



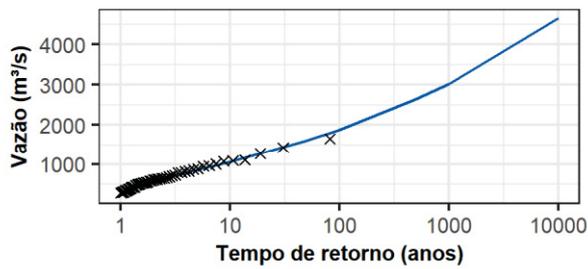
Chavantes (49)



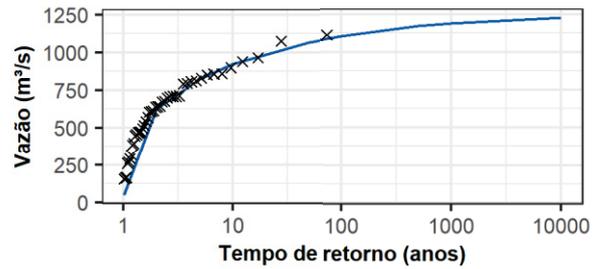
Coaracy Nun. (280)



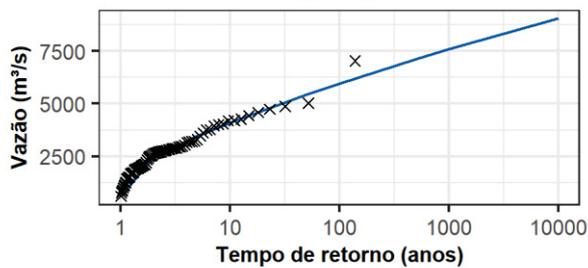
Corumbá III (23)



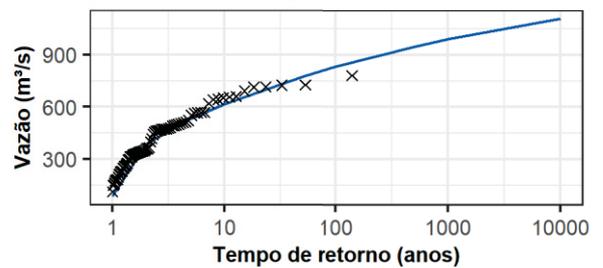
Curuá-Uná (277)



D. Francisca (114)

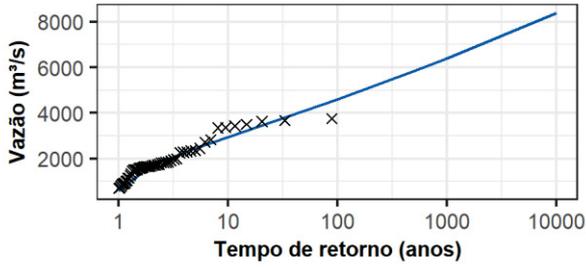


E. da Cunha (15)

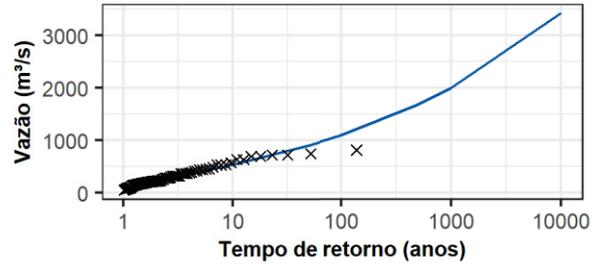


Legenda — Vazão de Projeto - Série Histórica × Vazão Máxima - Série Histórica

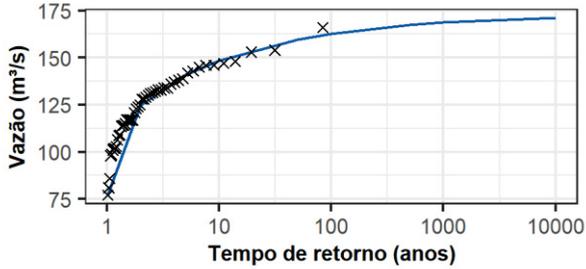
Emborcação (24)



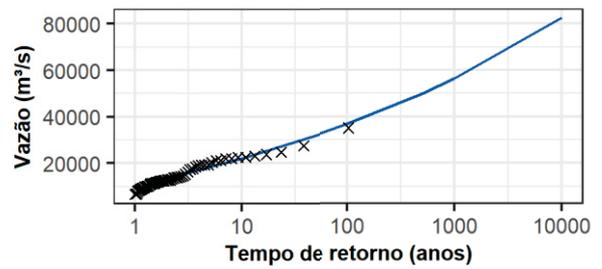
Ernestina (110)



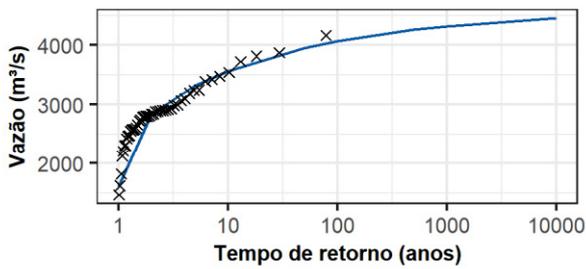
Espora (99)



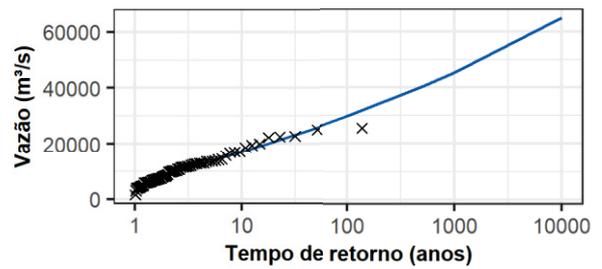
Estreito Tocantins (271)



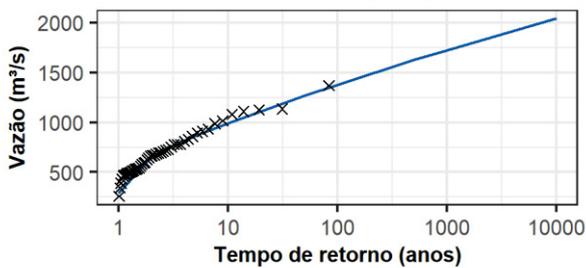
Ferreira Gomes (297)



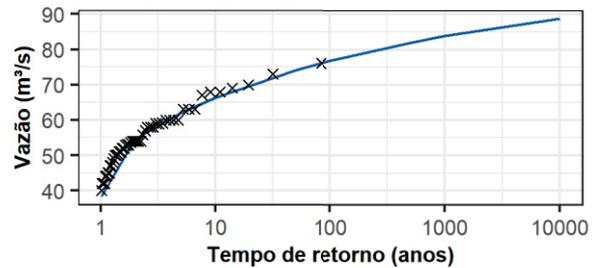
Foz Chapecó (94)



Foz do Rio Claro (261)

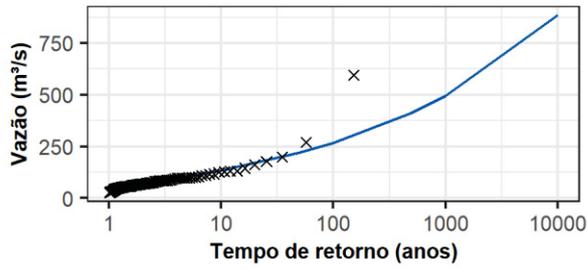


Guaporé (296)

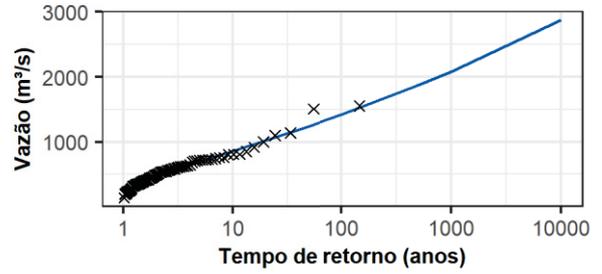


Legenda — Vazão de Projeto - Série Histórica × Vazão Máxima - Série Histórica

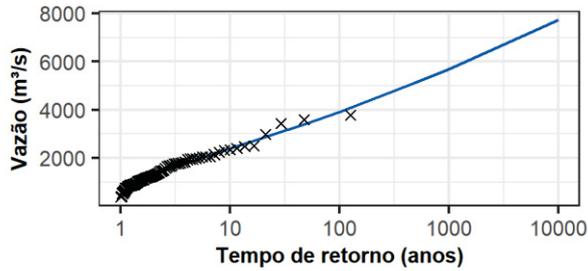
Guarapiranga (117)



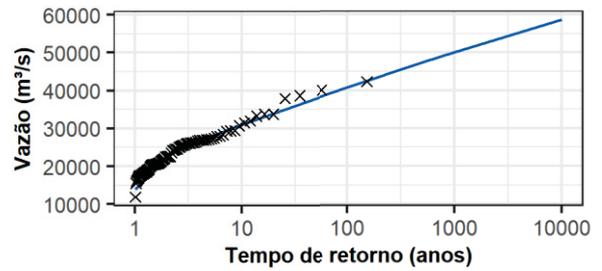
Guilman-Amorim (262)



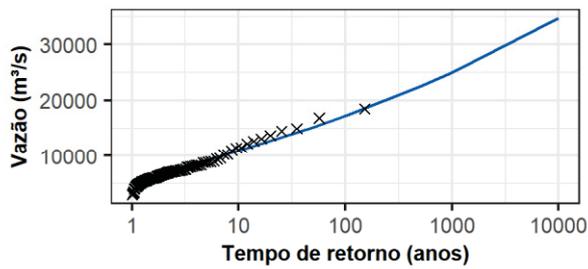
Irapé (255)



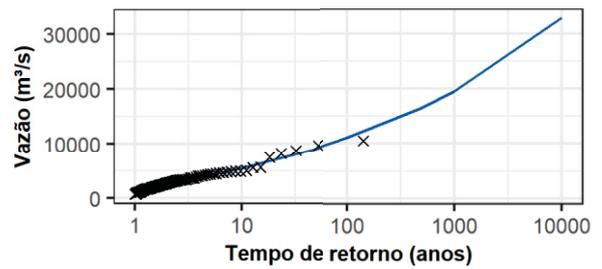
Itaipu (266)



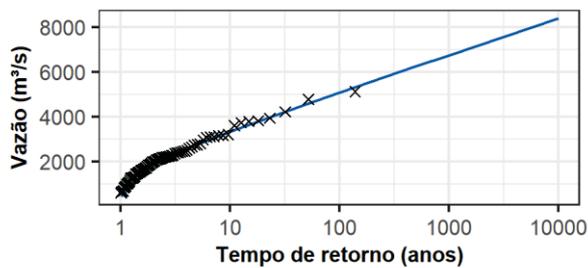
Itaparica (172)



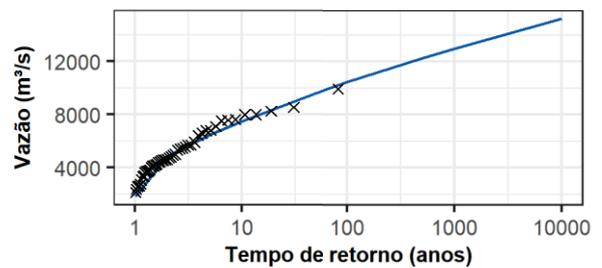
Itapebi (188)



Itaúba (113)

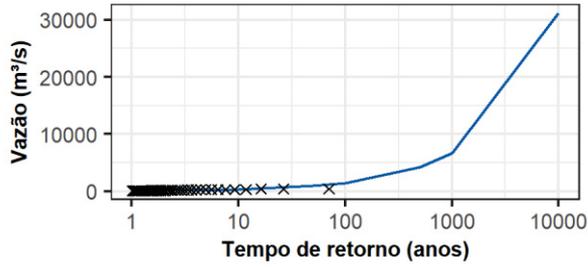


Itumbiara (31)

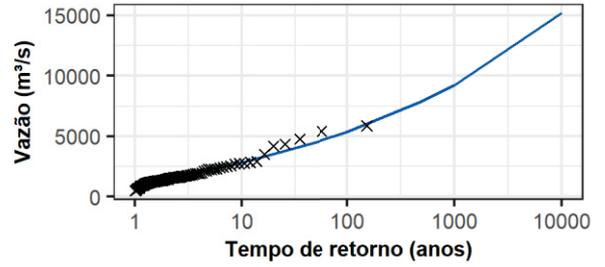


Legenda — Vazão de Projeto - Série Histórica × Vazão Máxima - Série Histórica

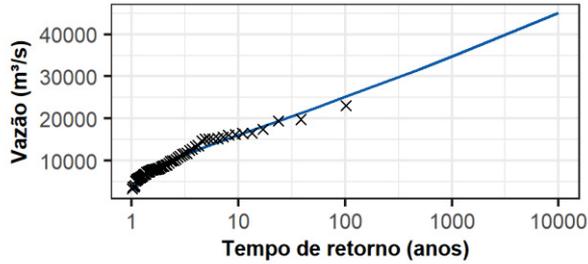
Jauru (295)



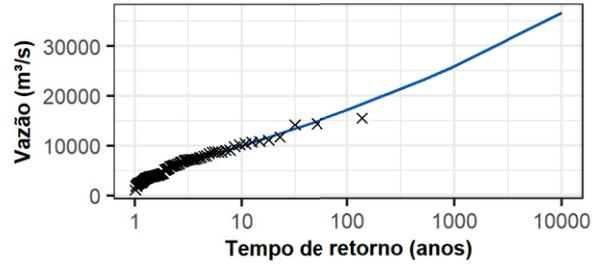
L. N. Garcez (50)



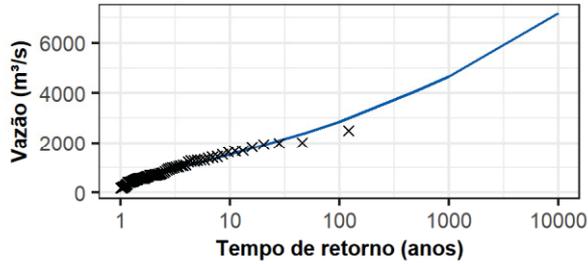
Lajeado (273)



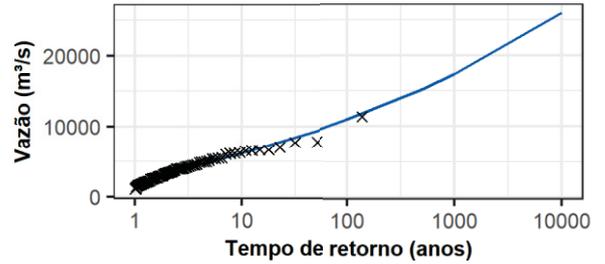
Machadinho (217)



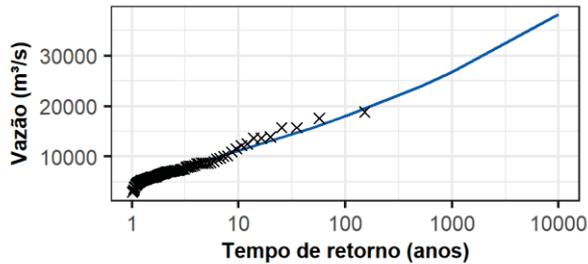
Monjolino (220)



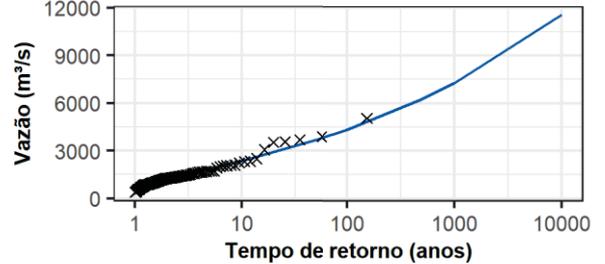
Monte Claro (97)



Moxotó (173)

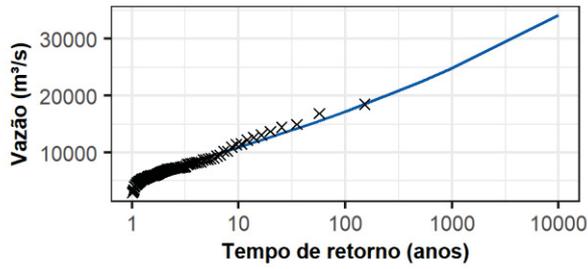


Ourinhos (249)

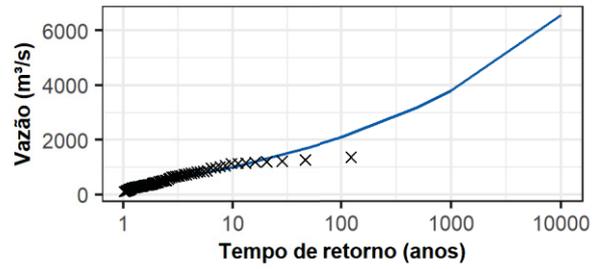


Legenda — Vazão de Projeto - Série Histórica × Vazão Máxima - Série Histórica

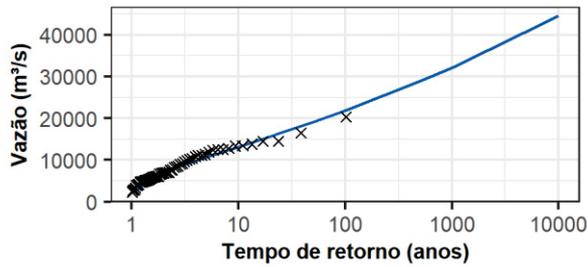
P. Afonso (175)



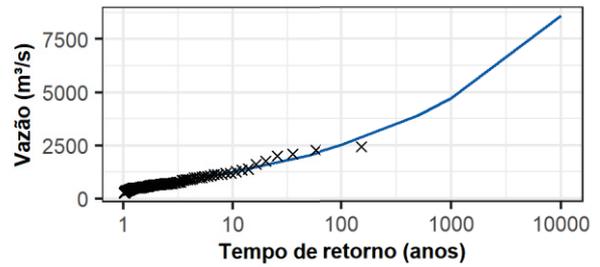
Passo Fundo (93)



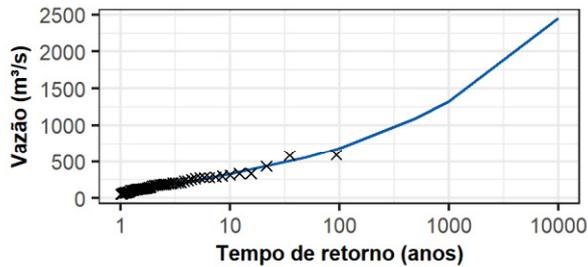
Peixe Angical (257)



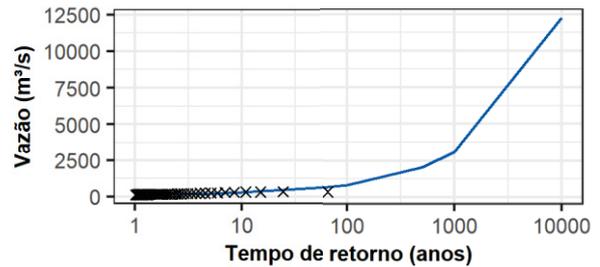
Piraju (48)



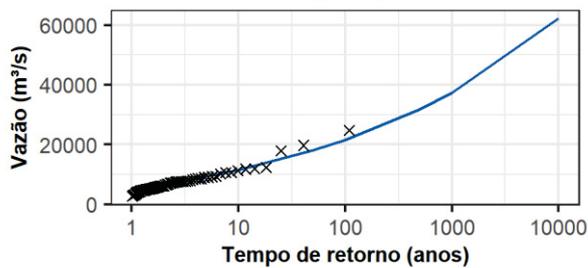
Queimado (158)



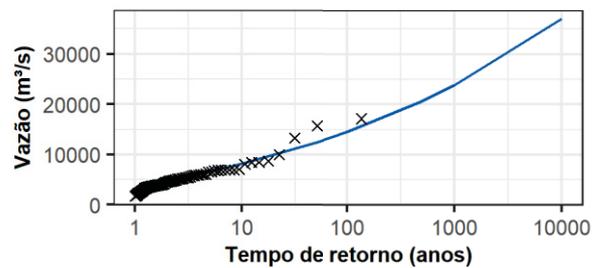
Rondon II (145)



Salto Caxias (222)

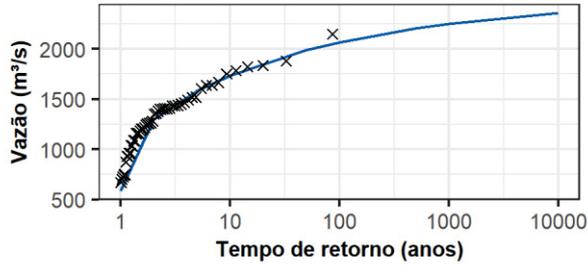


Salto Osório (78)

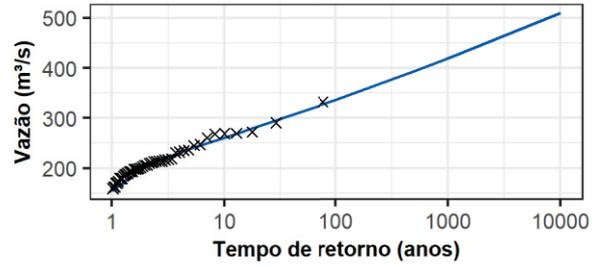


Legenda — Vazão de Projeto - Série Histórica × Vazão Máxima - Série Histórica

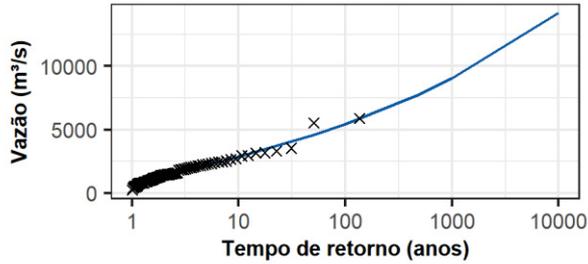
Samuel (279)



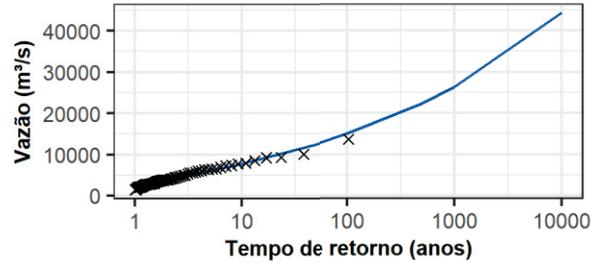
São Domingos (154)



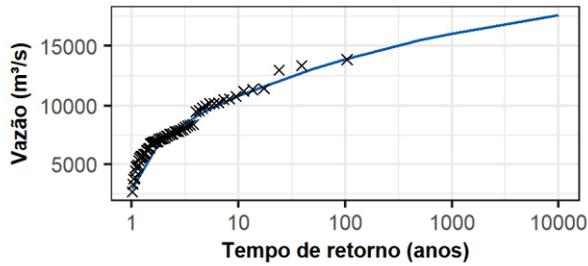
São Roque (88)



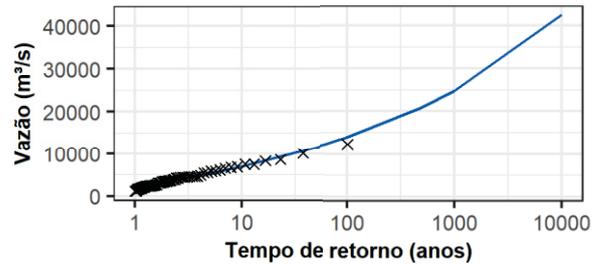
São Salvador (253)



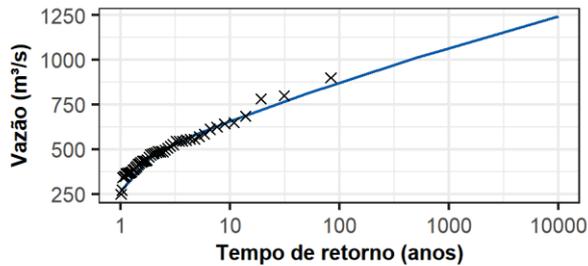
São Simão (33)



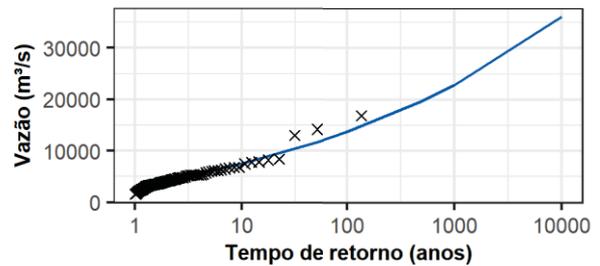
Serra Mesa (270)



Salto Verdinho (241)

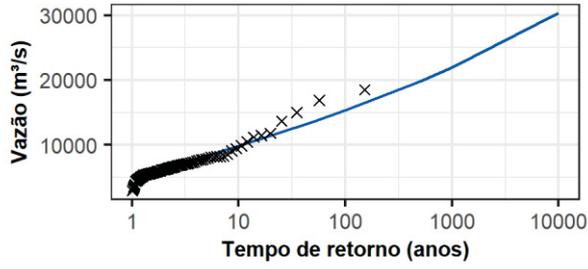


Salto Santiago (77)

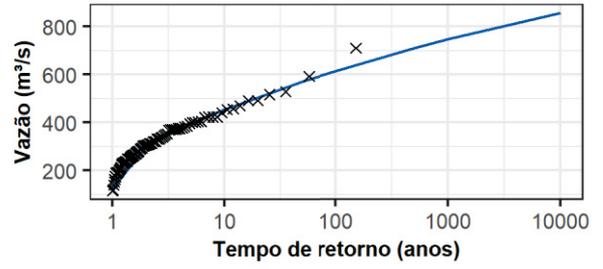


Legenda — Vazão de Projeto - Série Histórica × Vazão Máxima - Série Histórica

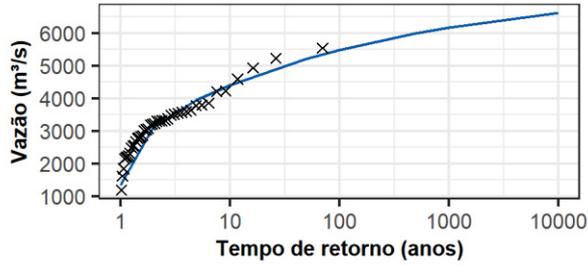
Sobradinho (169)



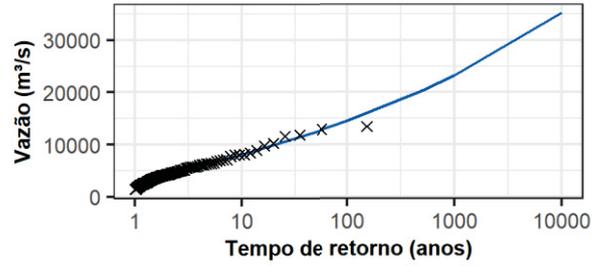
Sobragi (198)



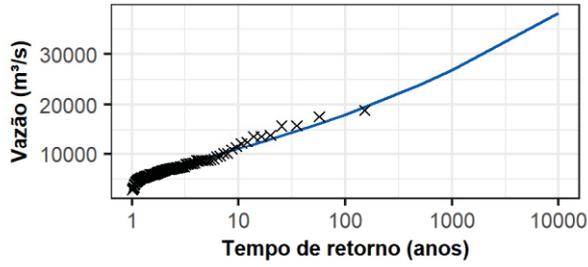
Santo Ant Jari (290)



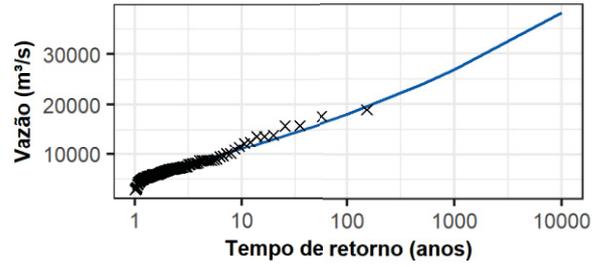
Taquaruçu (62)



Xingó (178)

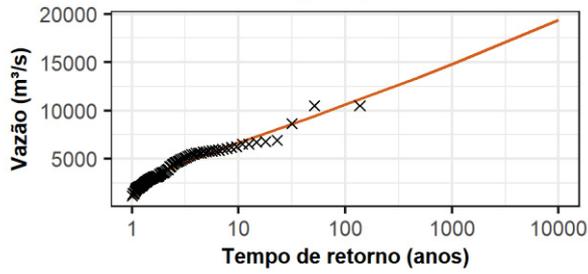


Compl. P. Af. Moxotó (176)

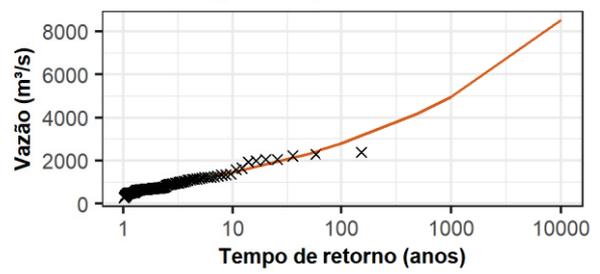


Legenda — Vazão de Projeto - Série Histórica × Vazão Máxima - Série Histórica

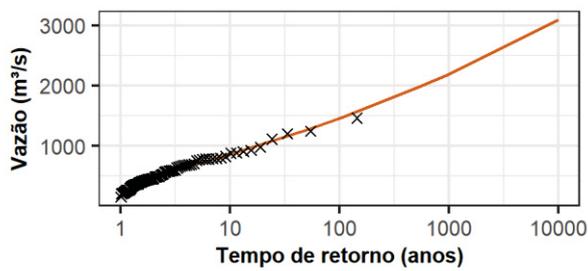
14 de Julho (284)



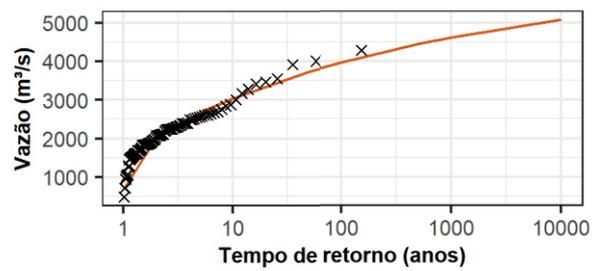
A.A. Laydner (47)



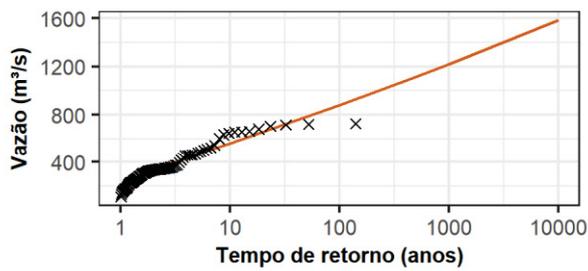
A.Dias+S.Car (183)



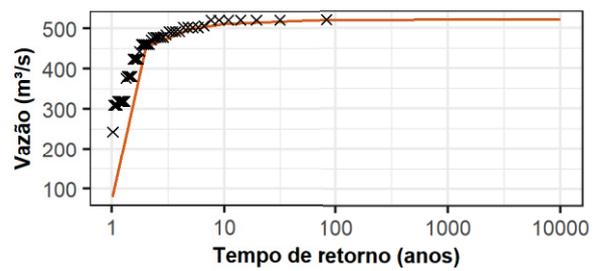
A.S. Lima (238)



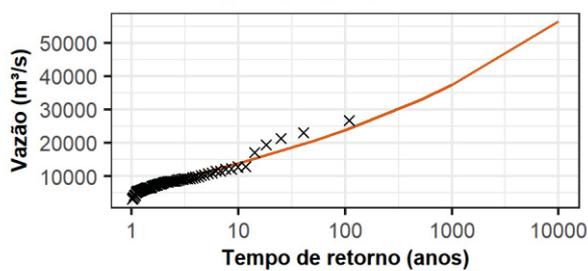
A.S.Oliveira (16)



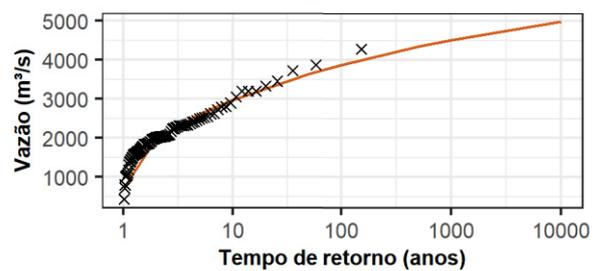
B. Coqueiros (248)



Baixo Iguaçu (81)

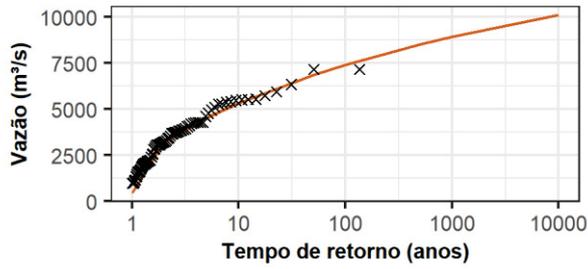


Barra Bonita (237)

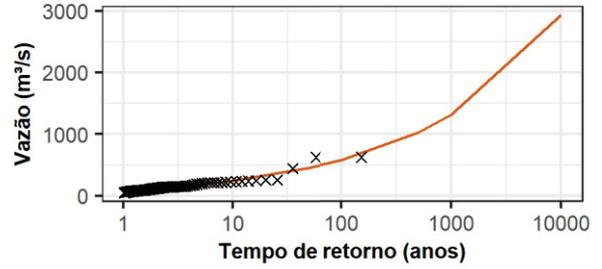


Legenda — Vazão de Projeto - Método EQM × Vazão Máxima - Método EQM

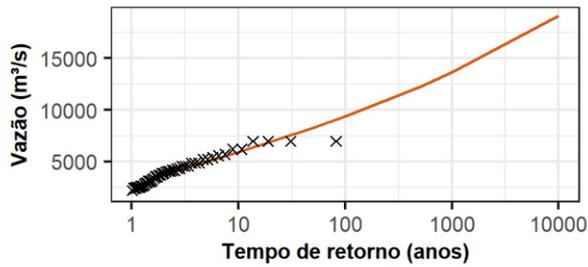
Barra Grande (215)



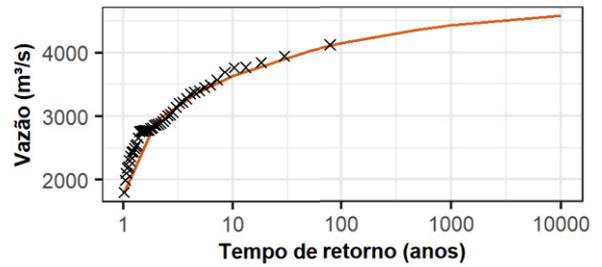
Billings (118)



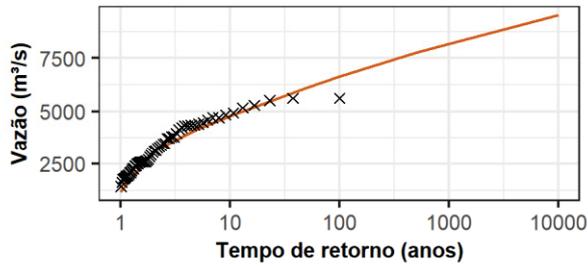
Cach. Dourada (32)



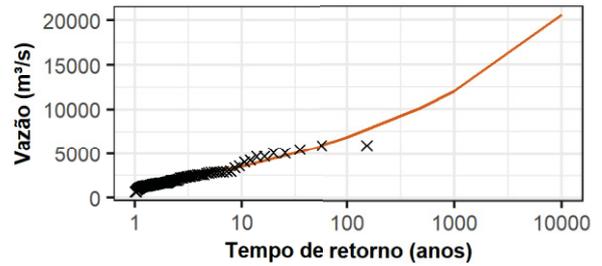
Cach. Caldeirão (204)



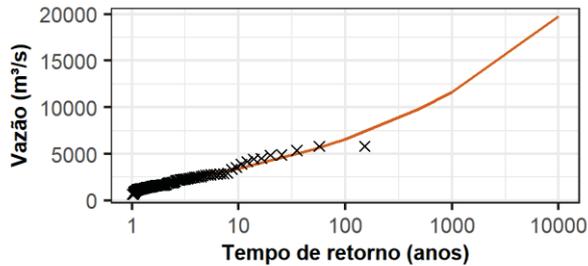
Cana Brava (191)



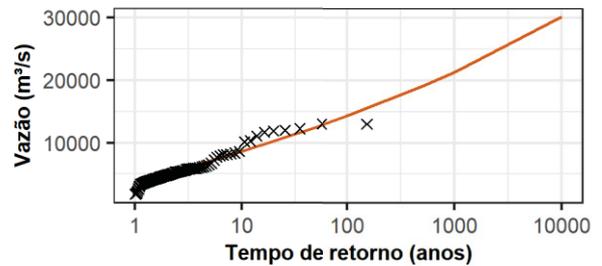
Canoas I (52)



Canoas II (51)

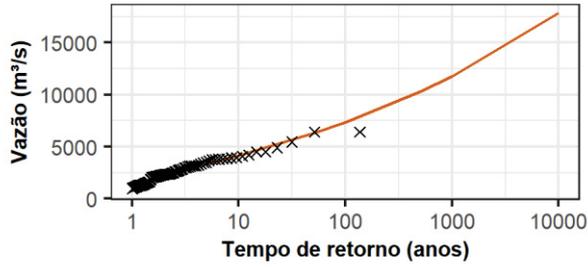


Capivara (61)

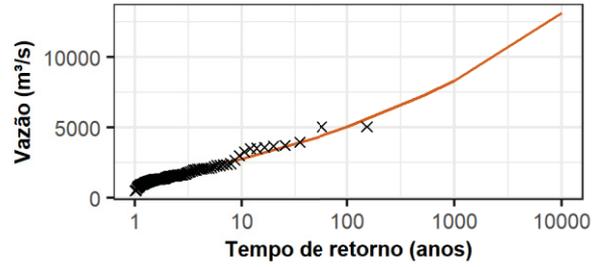


Legenda — Vazão de Projeto - Método EQM × Vazão Máxima - Método EQM

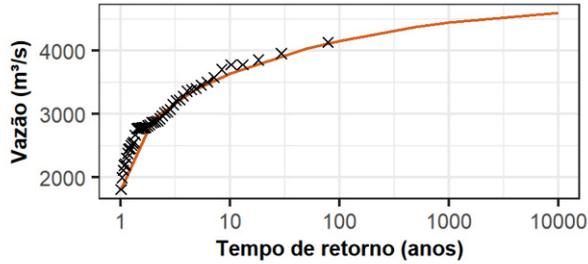
Castro Alves (98)



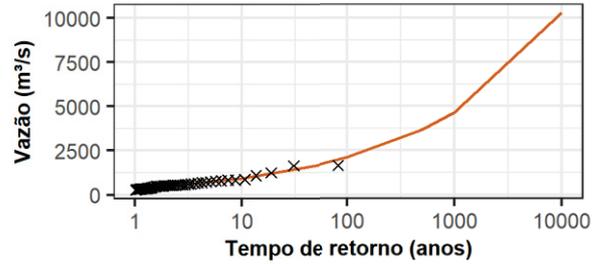
Chavantes (49)



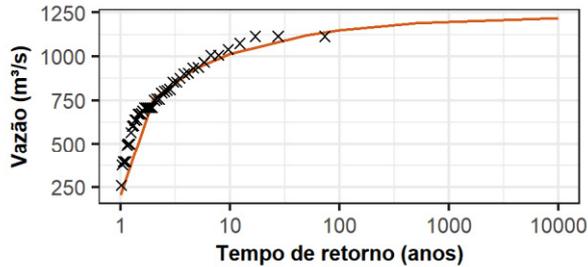
Coaracy Nun. (280)



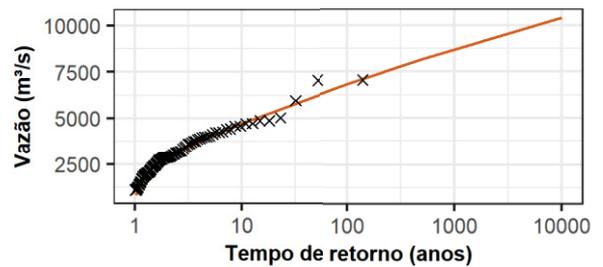
Corumbá III (23)



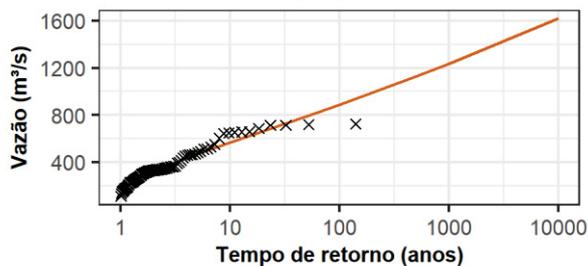
Curuá-Uná (277)



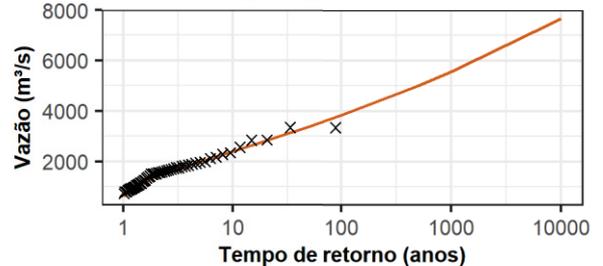
D. Francisca (114)



E. da Cunha (15)

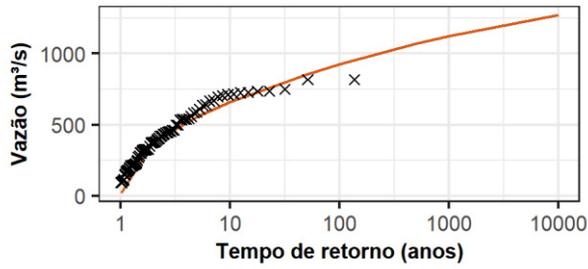


Emborcação (24)

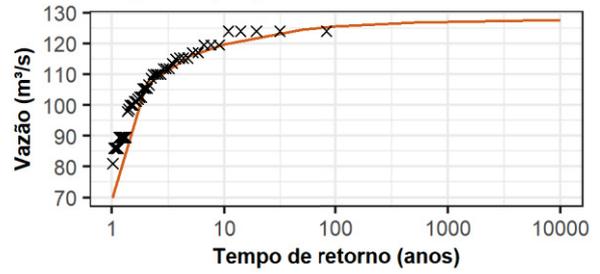


Legenda — Vazão de Projeto - Método EQM × Vazão Máxima - Método EQM

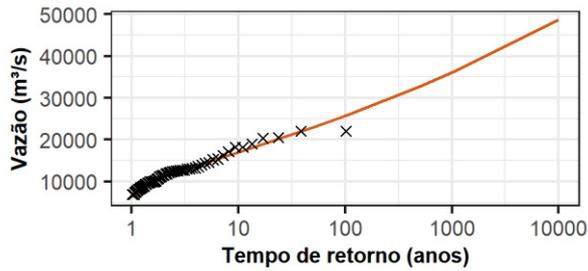
Ernestina (110)



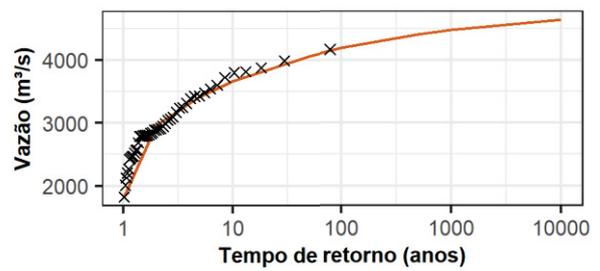
Espora (99)



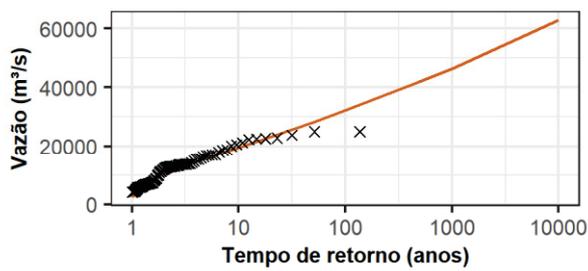
Estreito Tocantins (271)



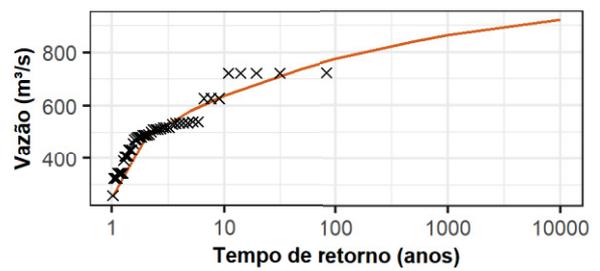
Ferreira Gomes (297)



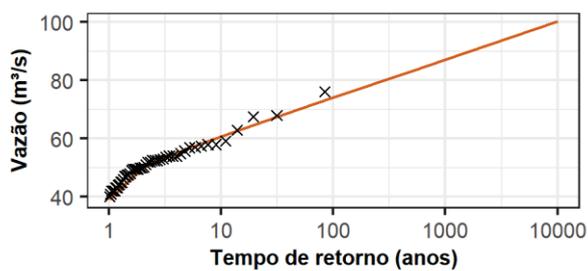
Foz Chapecó (94)



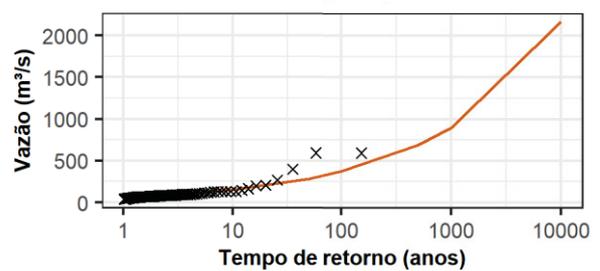
Foz do Rio Claro (261)



Guaporé (296)

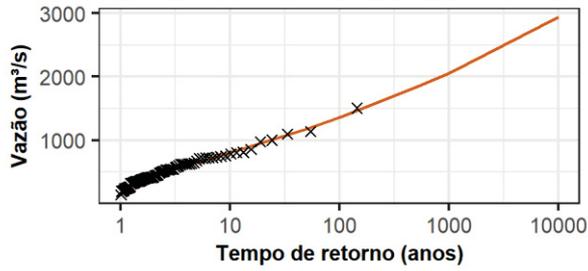


Guarapiranga (117)

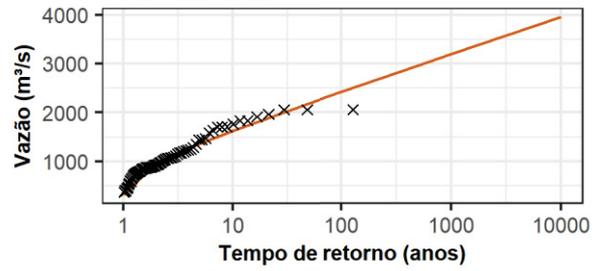


Legenda — Vazão de Projeto - Método EQM × Vazão Máxima - Método EQM

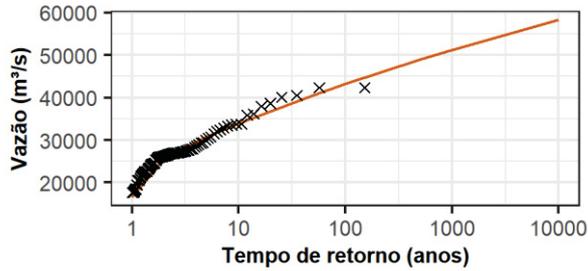
Guilman-Amorim (262)



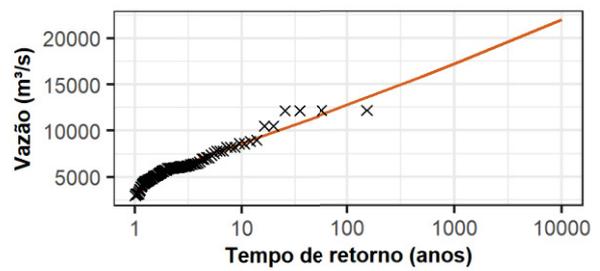
Irapé (255)



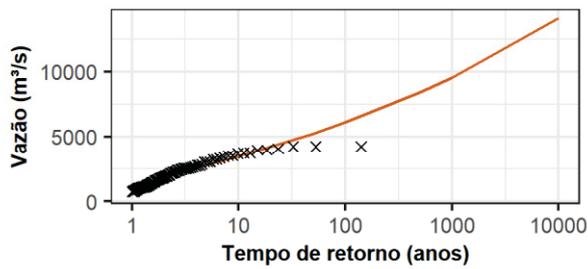
Itaipu (266)



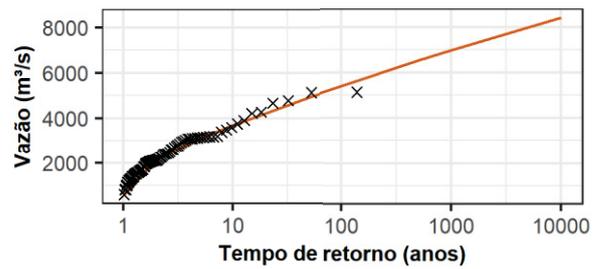
Itaparica (172)



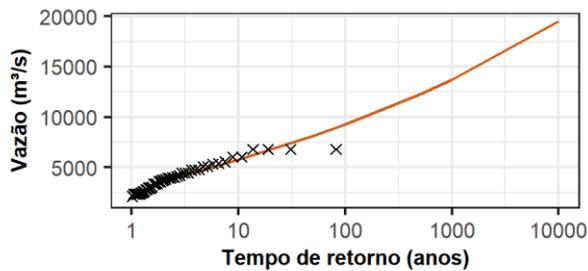
Itapebi (188)



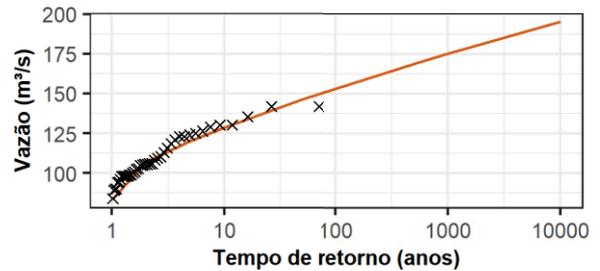
Itaúba (113)



Itumbiara (31)

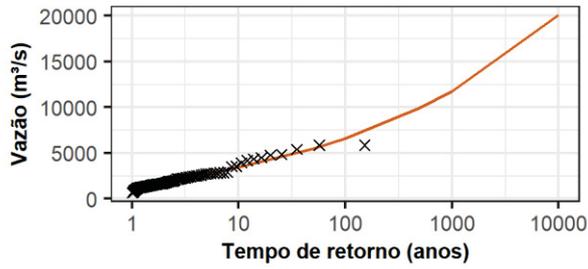


Jauru (295)

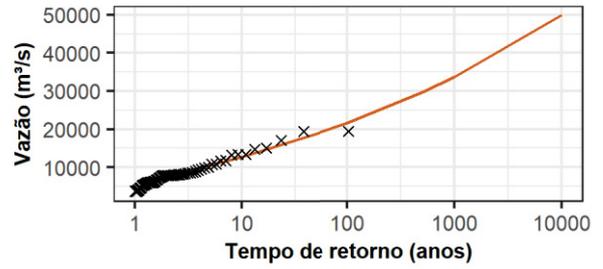


Legenda — Vazão de Projeto - Método EQM × Vazão Máxima - Método EQM

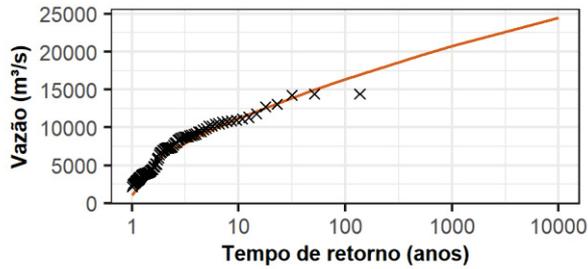
L. N. Garcez (50)



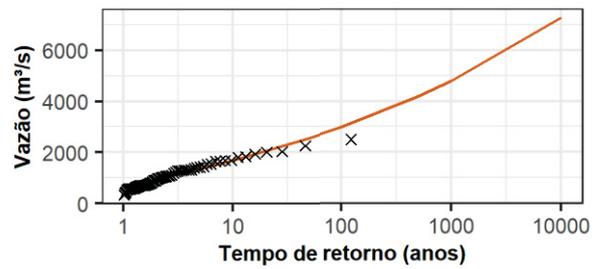
Lajeado (273)



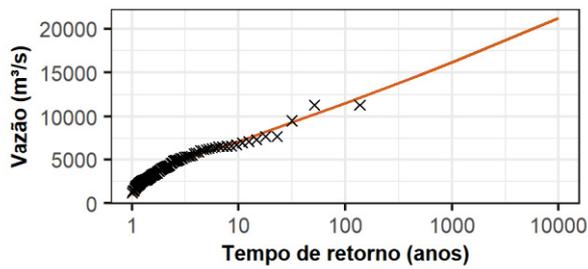
Machadinho (217)



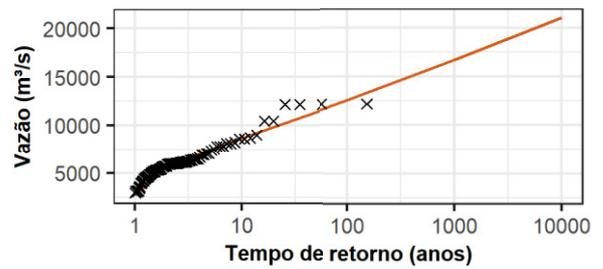
Monjolino (220)



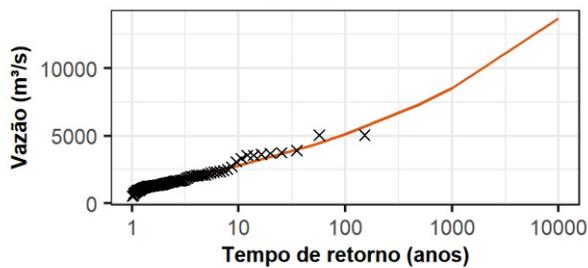
Monte Claro (97)



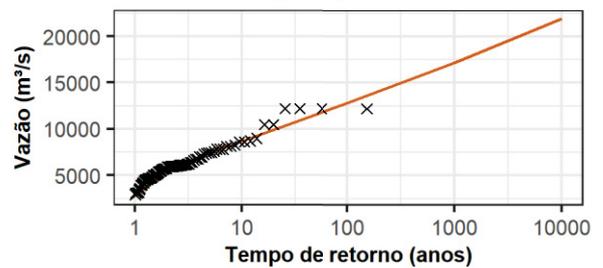
Moxotó (173)



Ourinhos (249)

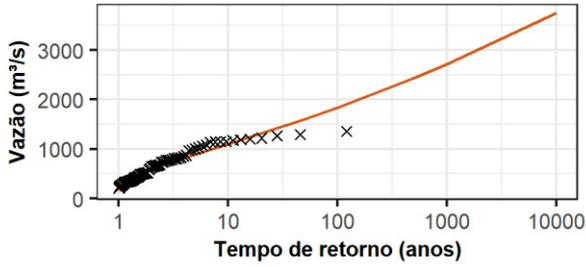


P. Afonso (175)

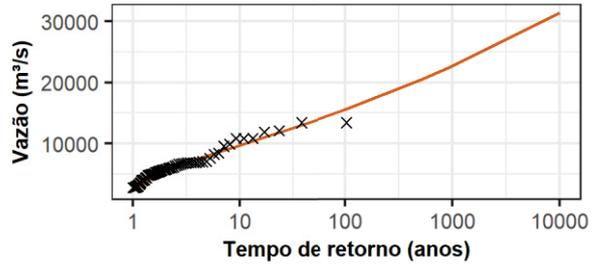


Legenda — Vazão de Projeto - Método EQM × Vazão Máxima - Método EQM

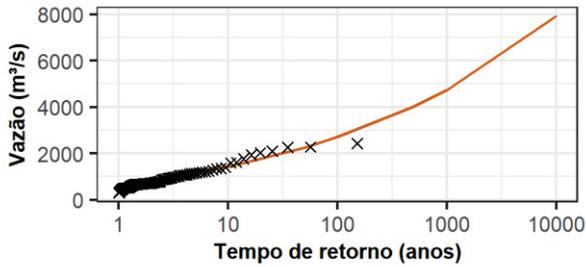
Passo Fundo (93)



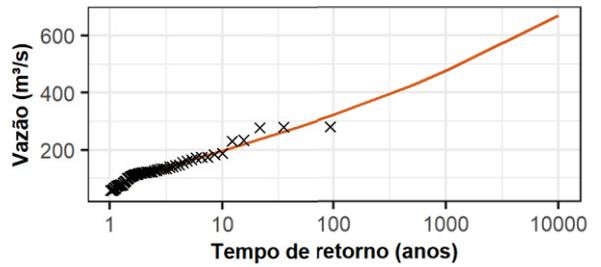
Peixe Angical (257)



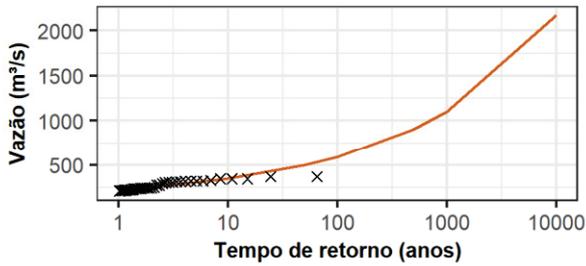
Piraju (48)



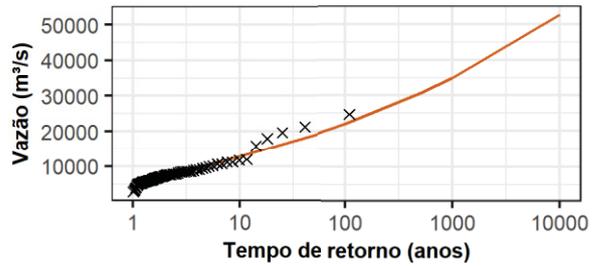
Queimado (158)



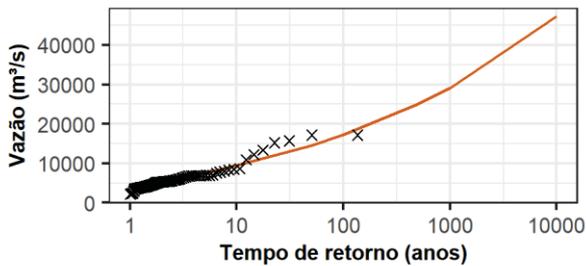
Rondon II (145)



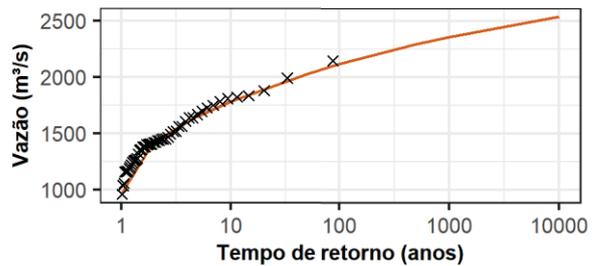
Salto Caxias (222)



Salto Osório (78)

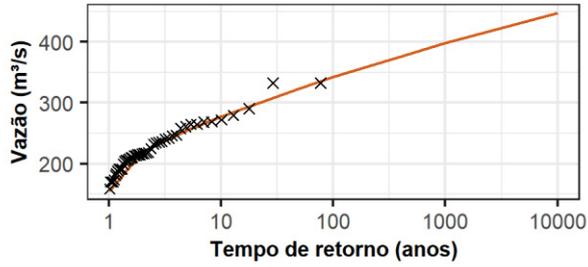


Samuel (279)

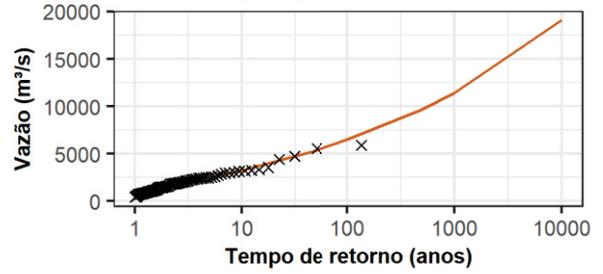


Legenda — Vazão de Projeto - Método EQM × Vazão Máxima - Método EQM

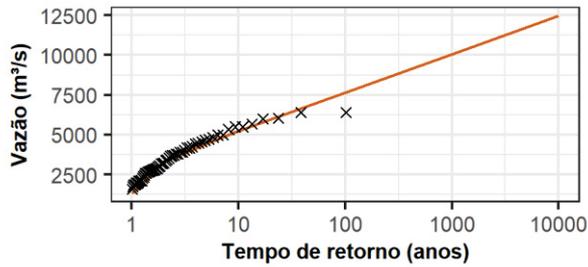
São Domingos (154)



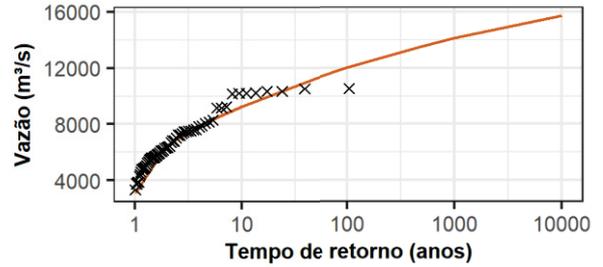
São Roque (88)



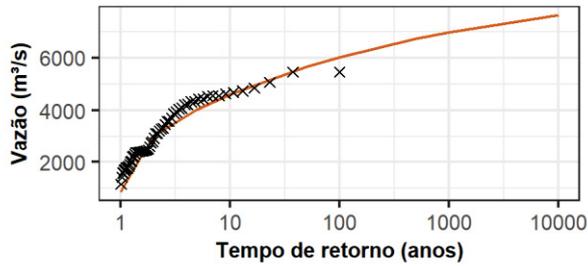
São Salvador (253)



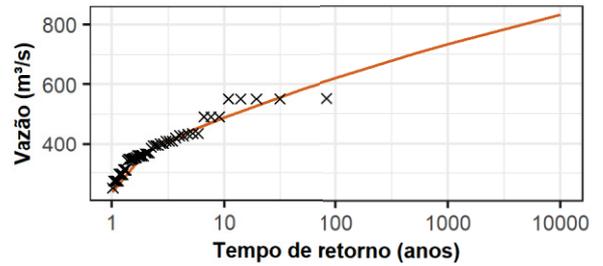
São Simão (33)



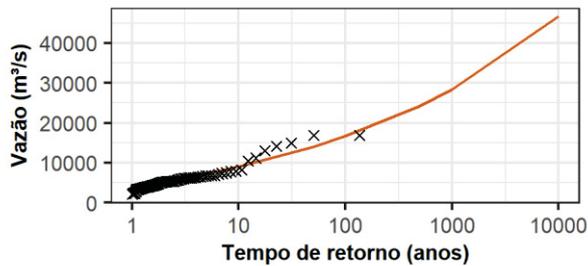
Serra Mesa (270)



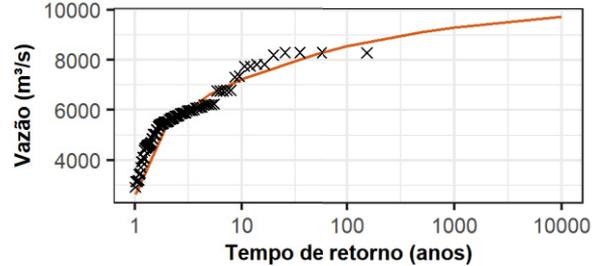
Salto Verdinho (241)



Salto Santiago (77)

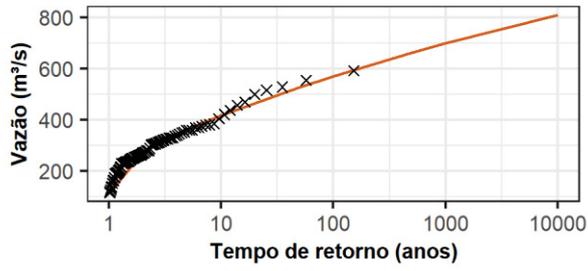


Sobradinho (169)

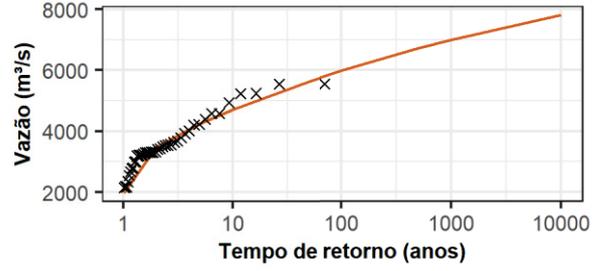


Legenda — Vazão de Projeto - Método EQM × Vazão Máxima - Método EQM

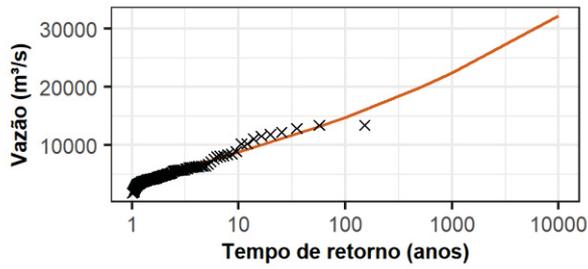
Sobragi (198)



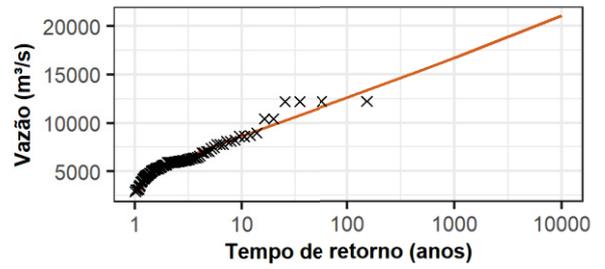
Santo Ant Jari (290)



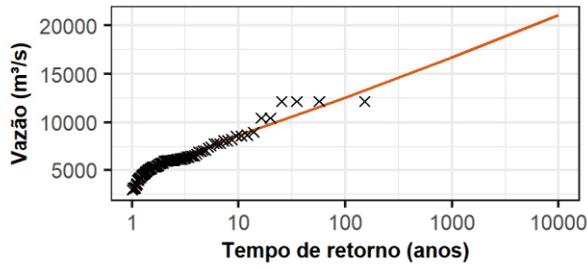
Taquaruçu (62)



Xingó (178)

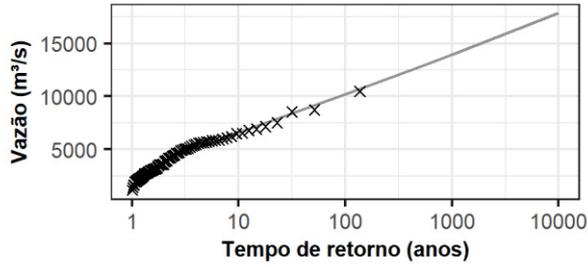


Compl. P. Af. Moxotó (176)

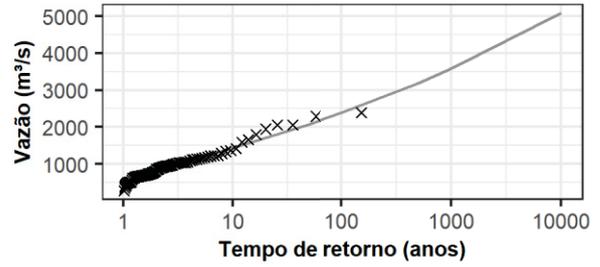


Legenda — Vazão de Projeto - Método EQM × Vazão Máxima - Método EQM

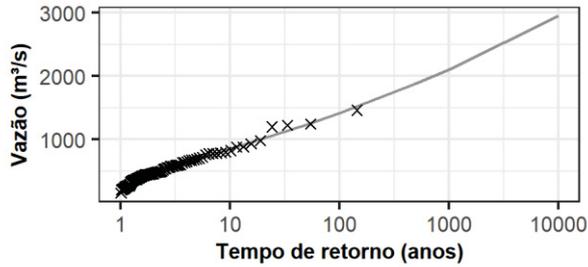
14 de Julho (284)



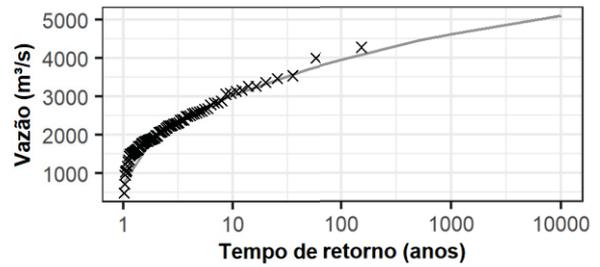
A.A. Laydner (47)



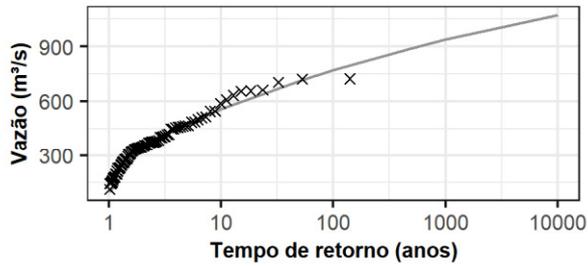
A.Dias+S.Car (183)



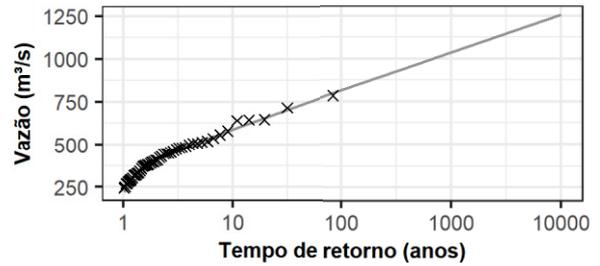
A.S. Lima (238)



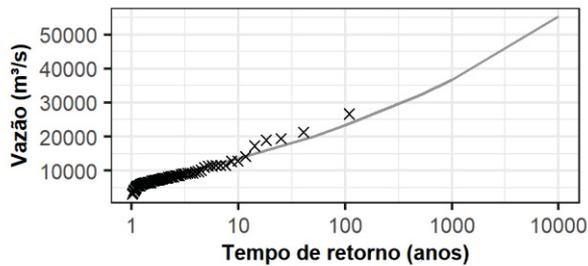
A.S.Oliveira (16)



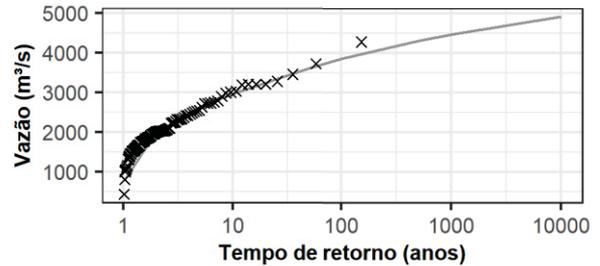
B. Coqueiros (248)



Baixo Iguaçu (81)

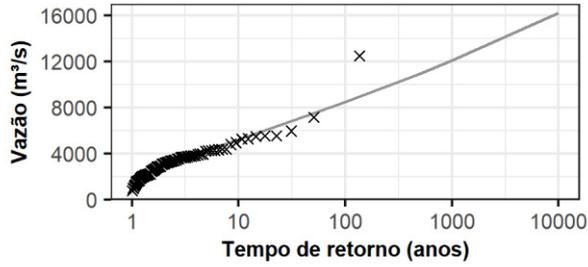


Barra Bonita (237)

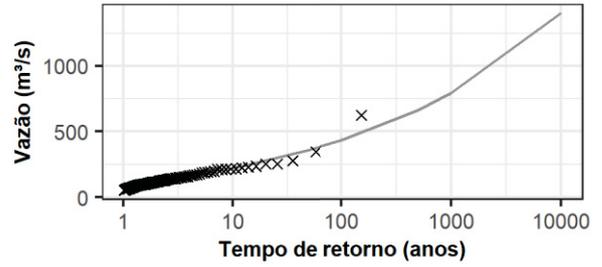


Legenda — Vazão de Projeto - Método Vazão Acumulada × Vazão Máxima - Método Vazão Acumulada

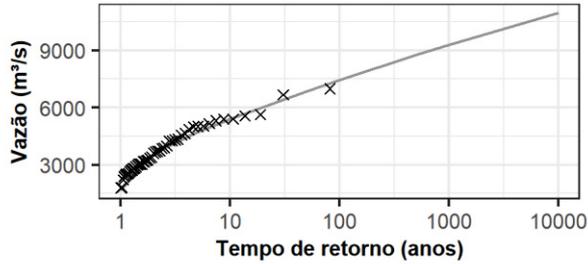
Barra Grande (215)



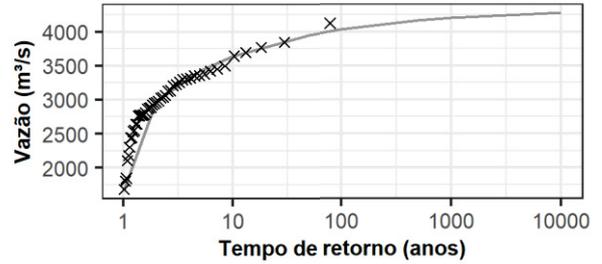
Billings (118)



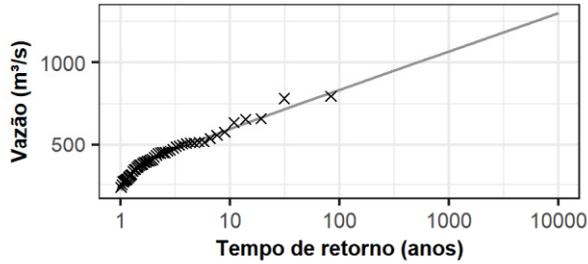
Cach. Dourada (32)



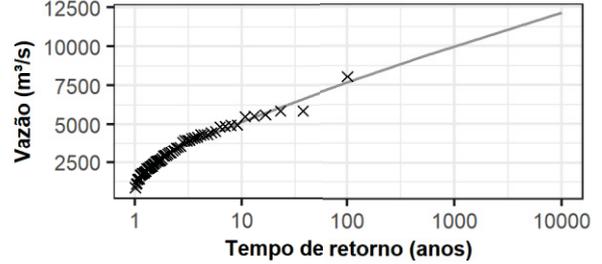
Cach. Caldeirão (204)



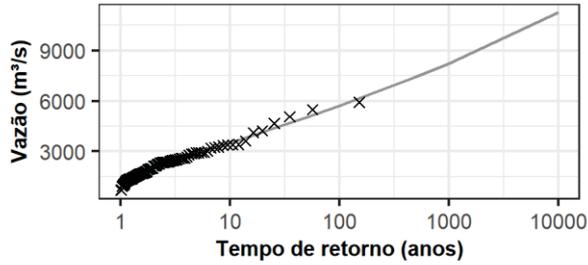
Caçú (247)



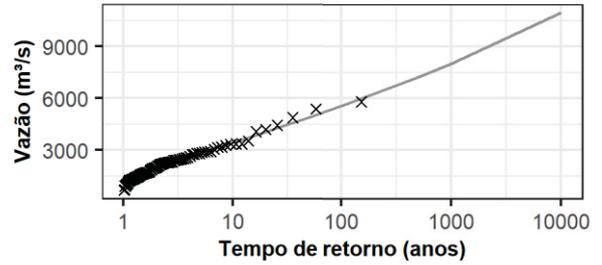
Cana Brava (191)



Canoas I (52)

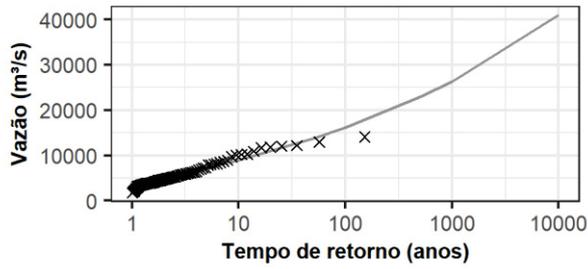


Canoas II (51)

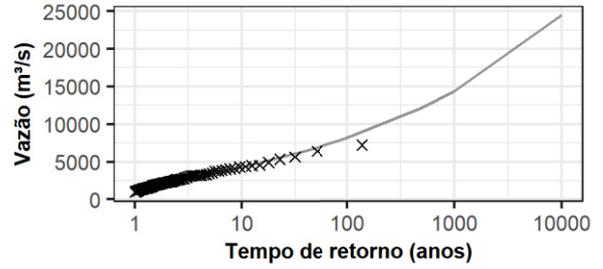


Legenda — Vazão de Projeto - Método Vazão Acumulada × Vazão Máxima - Método Vazão Acumulada

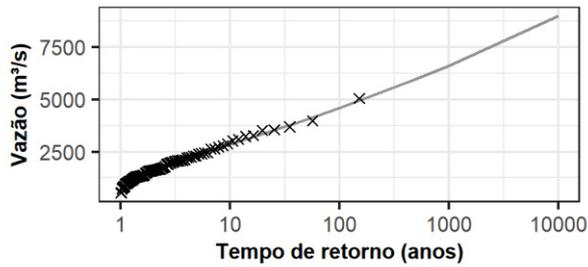
Capivara (61)



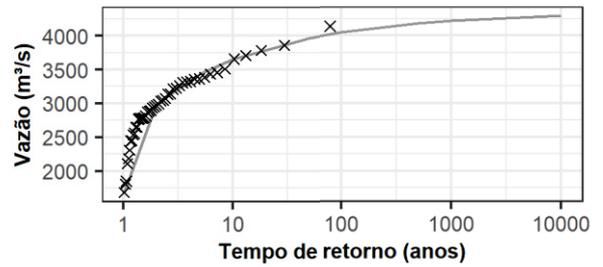
Castro Alves (98)



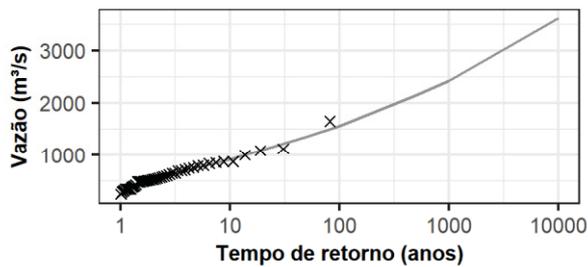
Chavantes (49)



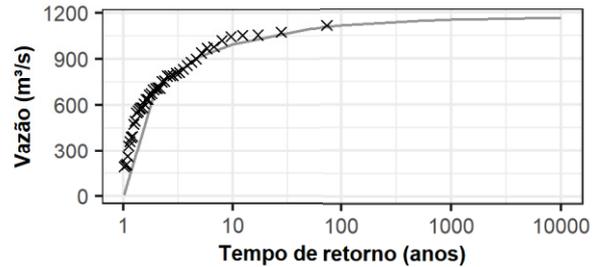
Coaracy Nun. (280)



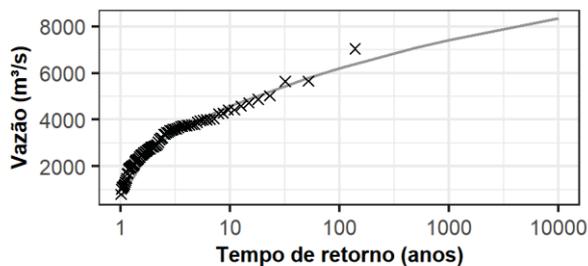
Corumbá III (23)



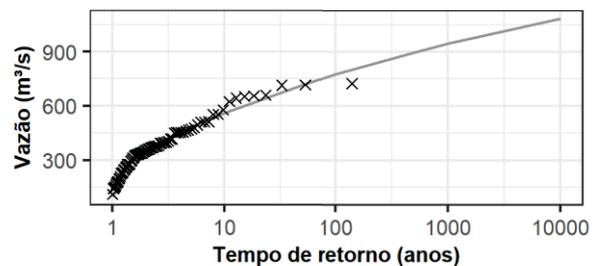
Curuá-Uná (277)



D. Francisca (114)

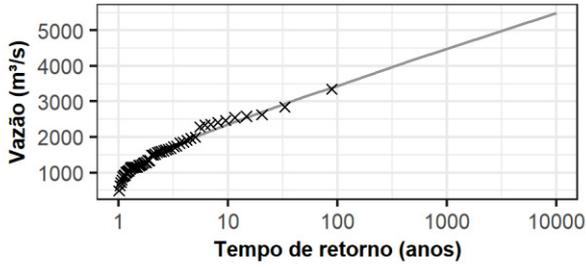


E. da Cunha (15)

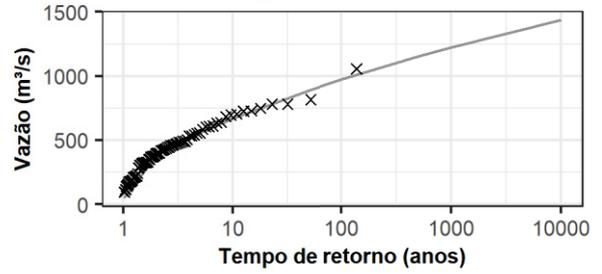


Legenda — Vazão de Projeto - Método Vazão Acumulada × Vazão Máxima - Método Vazão Acumulada

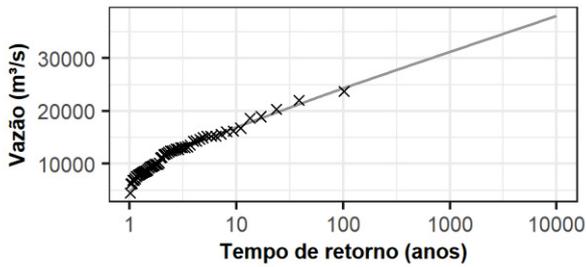
Emborcação (24)



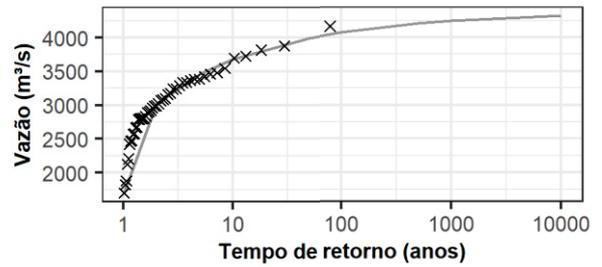
Ernestina (110)



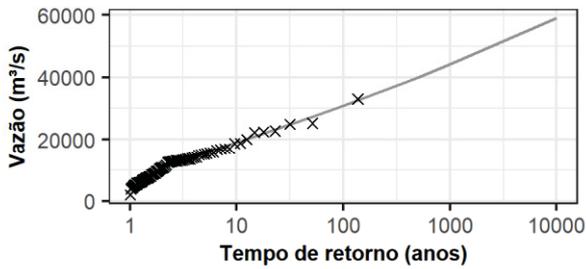
Estreito Tocantins (271)



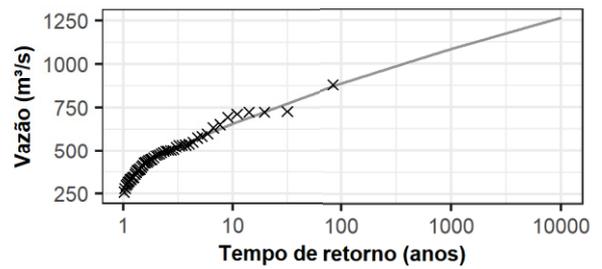
Ferreira Gomes (297)



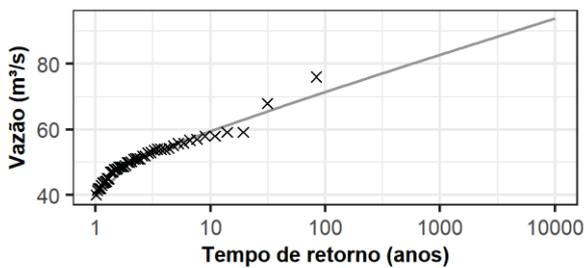
Foz Chapecó (94)



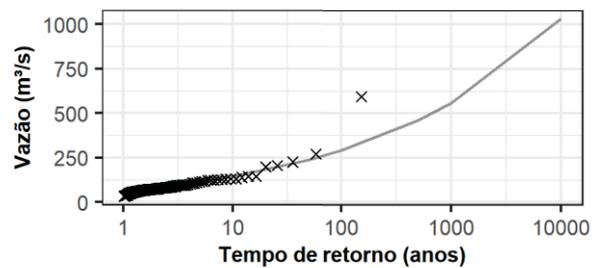
Foz do Rio Claro (261)



Guaporé (296)

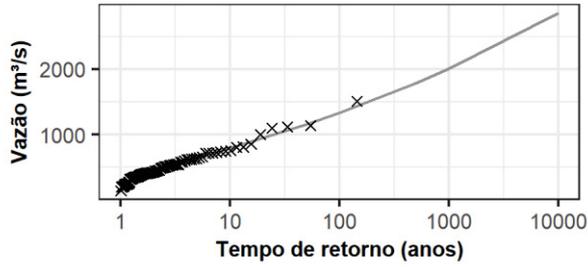


Guarapiranga (117)

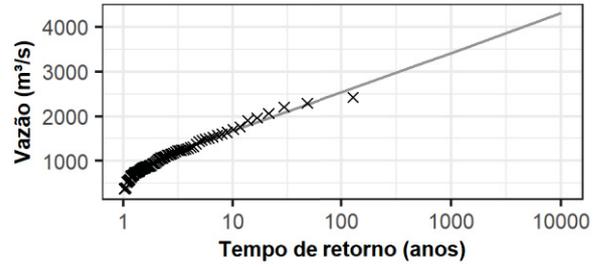


Legenda — Vazão de Projeto - Método Vazão Acumulada × Vazão Máxima - Método Vazão Acumulada

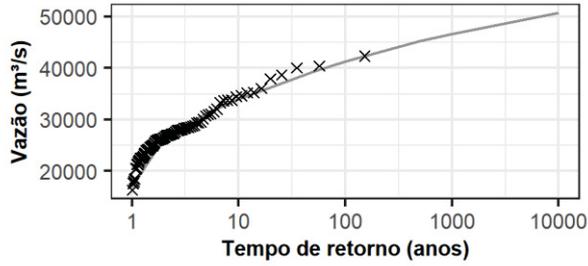
Guilman-Amorim (262)



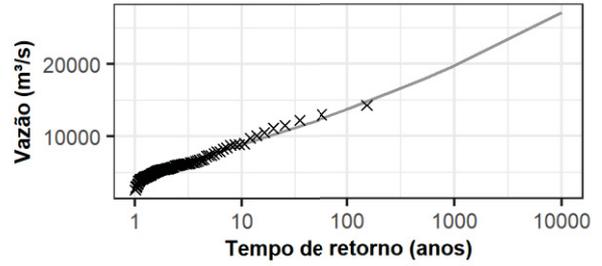
Irapé (255)



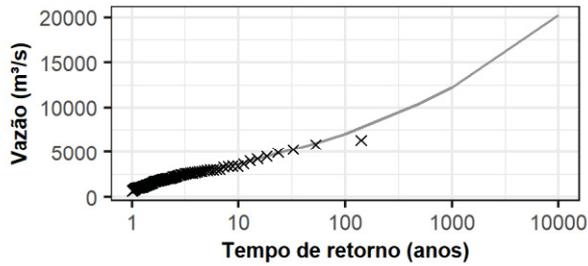
Itaipu (266)



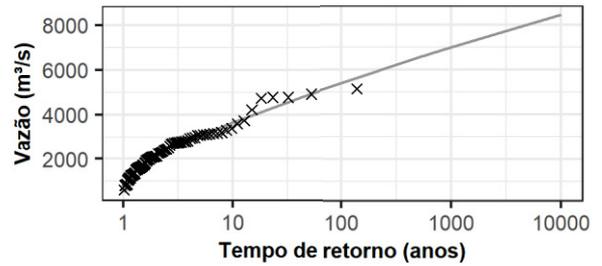
Itaparica (172)



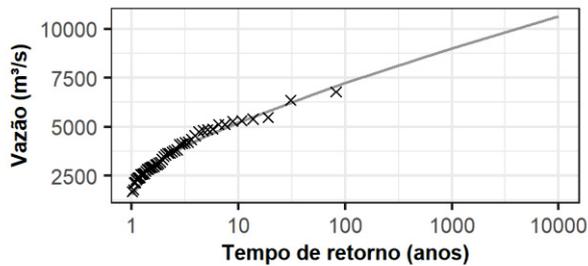
Itapebi (188)



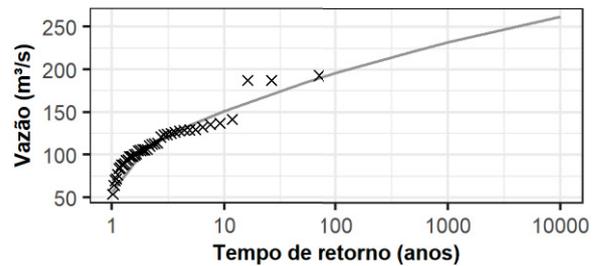
Itaúba (113)



Itumbiara (31)

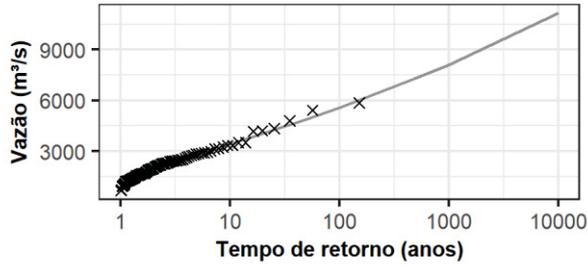


Jauru (295)

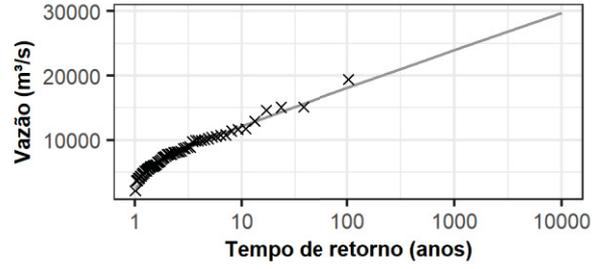


Legenda — Vazão de Projeto - Método Vazão Acumulada × Vazão Máxima - Método Vazão Acumulada

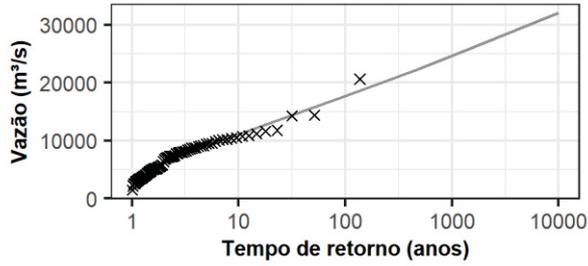
L. N. Garcez (50)



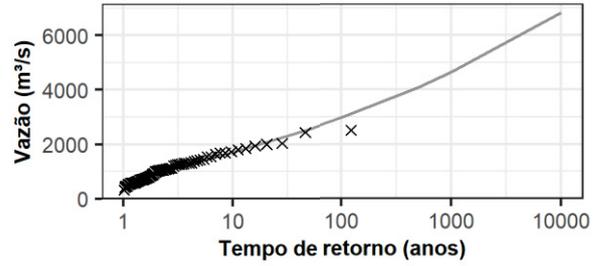
Lajeado (273)



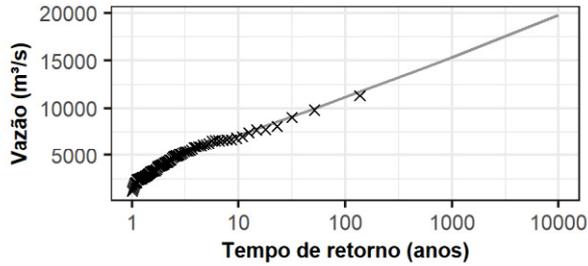
Machadinho (217)



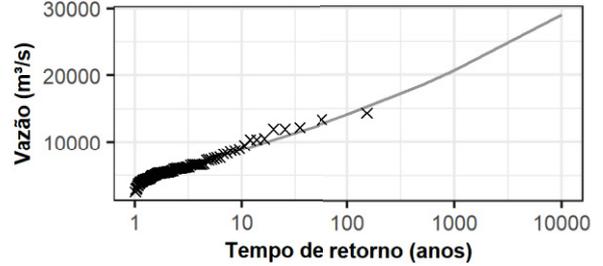
Monjolinho (220)



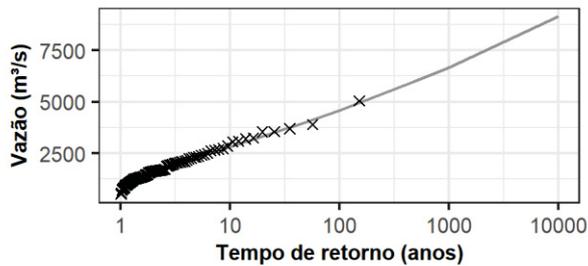
Monte Claro (97)



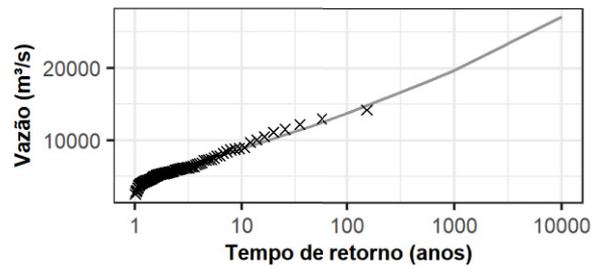
Moxotó (173)



Ourinhos (249)

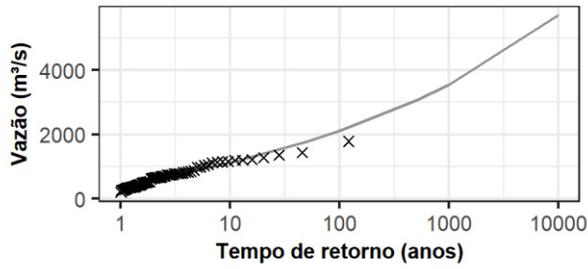


P. Afonso (175)

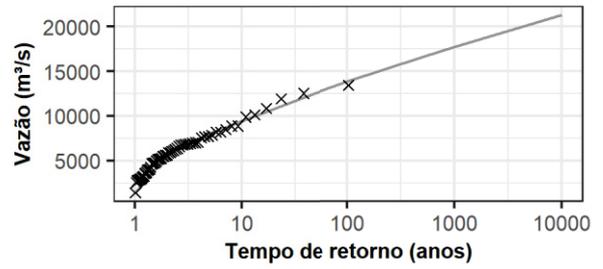


Legenda — Vazão de Projeto - Método Vazão Acumulada × Vazão Máxima - Método Vazão Acumulada

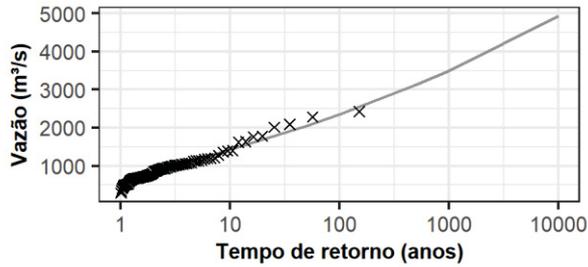
Passo Fundo (93)



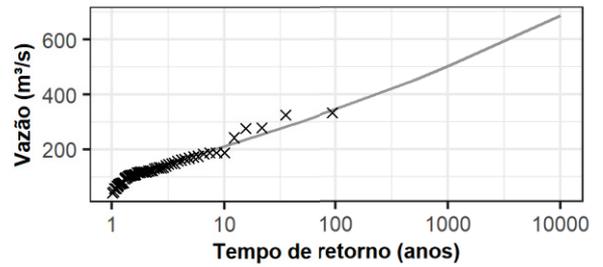
Peixe Angical (257)



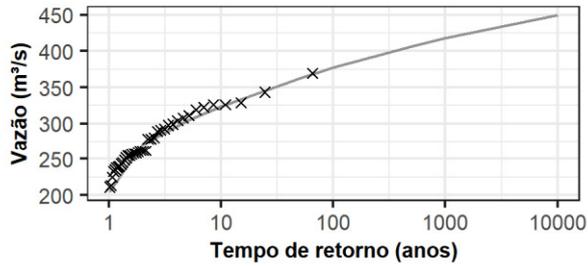
Piraju (48)



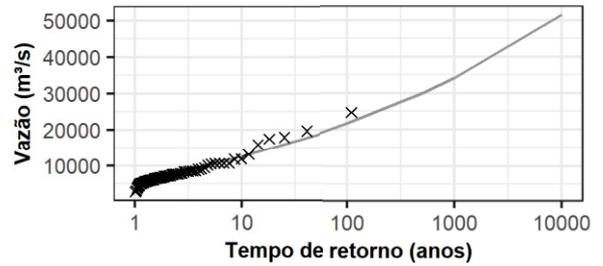
Queimado (158)



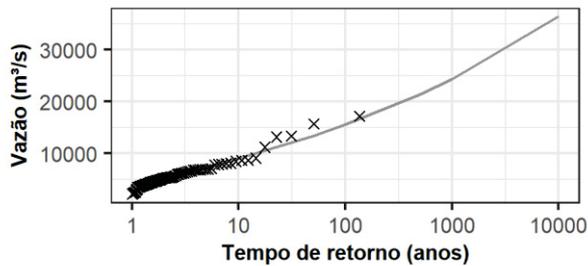
Rondon II (145)



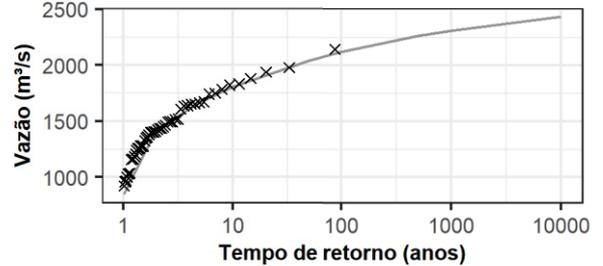
Salto Caxias (222)



Salto Osório (78)

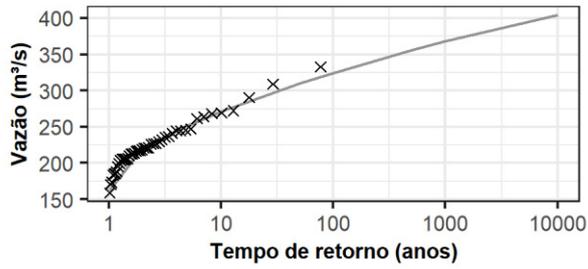


Samuel (279)

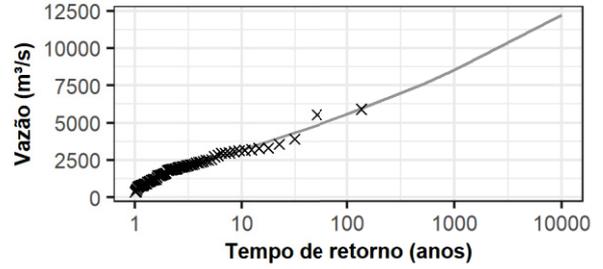


Legenda — Vazão de Projeto - Método Vazão Acumulada × Vazão Máxima - Método Vazão Acumulada

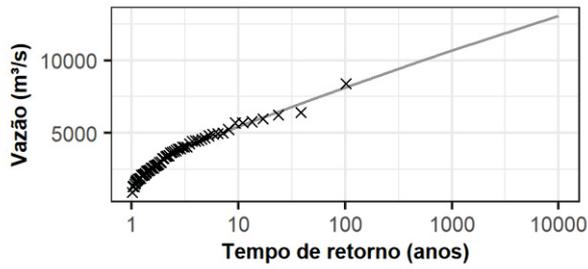
São Domingos (154)



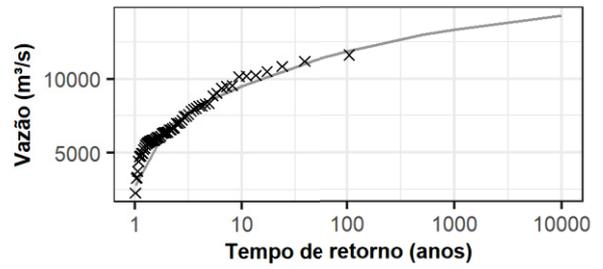
São Roque (88)



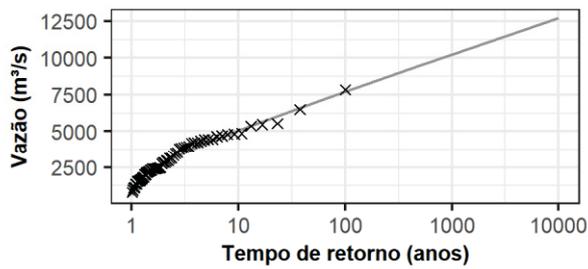
São Salvador (253)



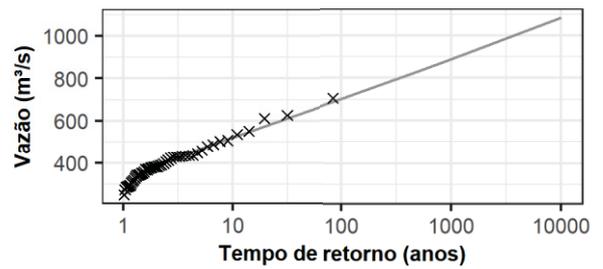
São Simão (33)



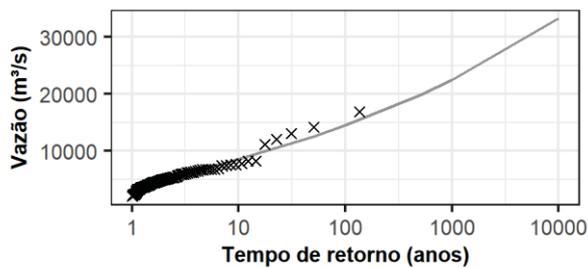
Serra Mesa (270)



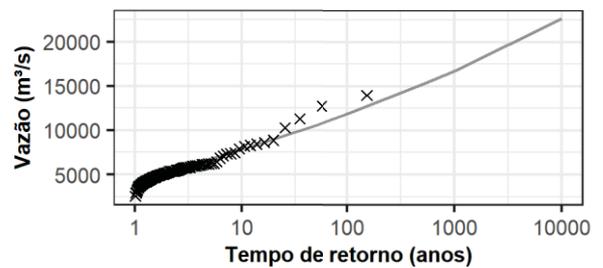
Salto Verdinho (241)



Salto Santiago (77)

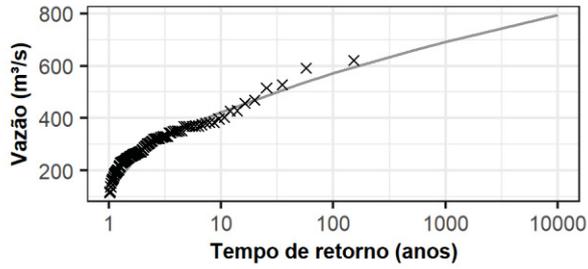


Sobradinho (169)

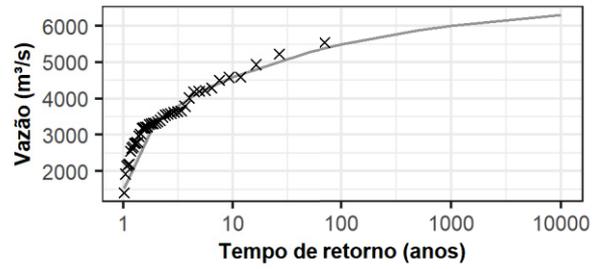


Legenda — Vazão de Projeto - Método Vazão Acumulada × Vazão Máxima - Método Vazão Acumulada

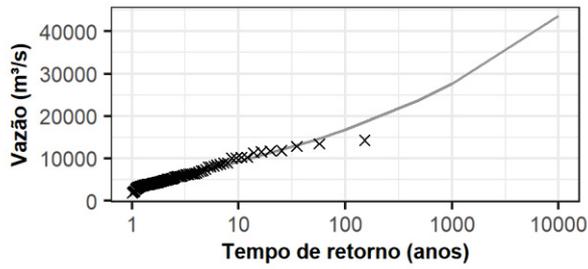
Sobragi (198)



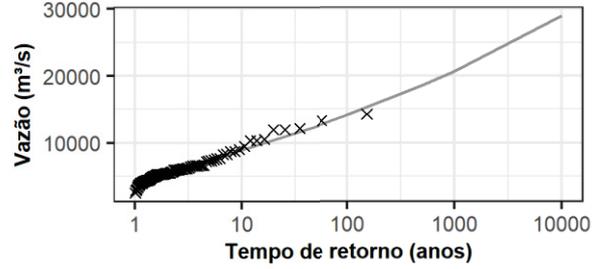
Santo Ant Jari (290)



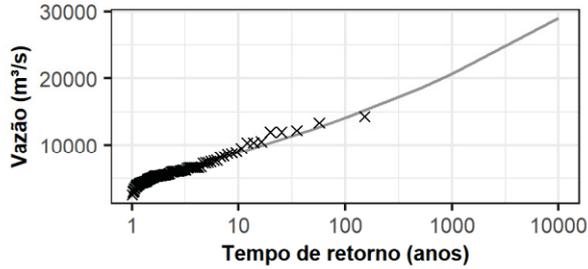
Taquaruçu (62)



Xingó (178)

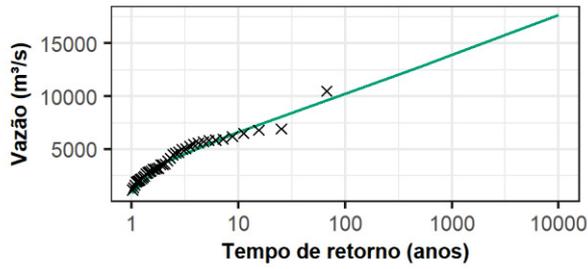


Compl. P. Af. Moxotó (176)

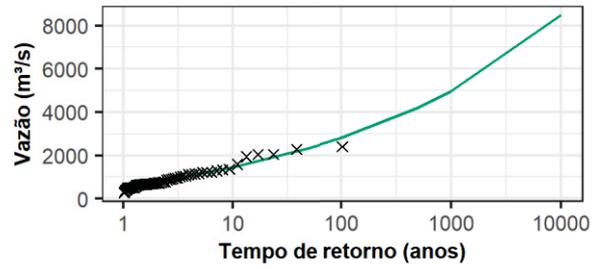


Legenda — Vazão de Projeto - Método Vazão Acumulada × Vazão Máxima - Método Vazão Acumulada

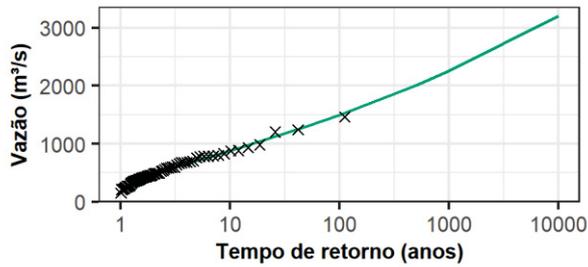
14 de Julho (284)



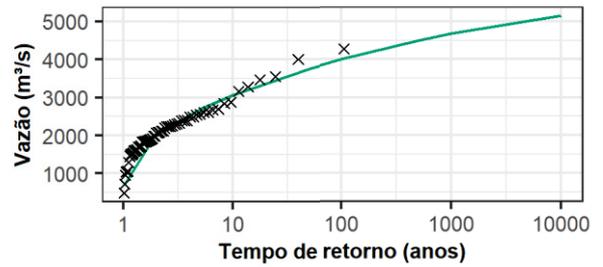
A.A. Laydner (47)



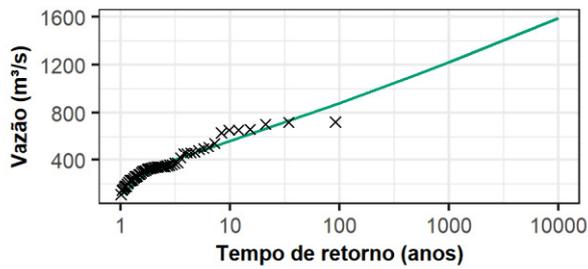
A.Dias+S.Car (183)



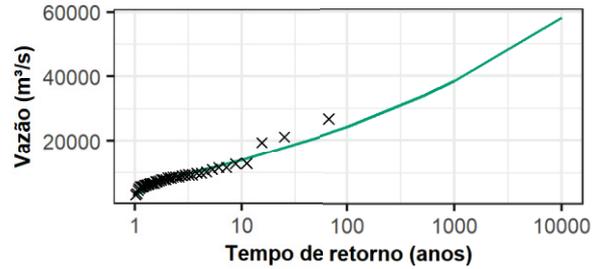
A.S. Lima (238)



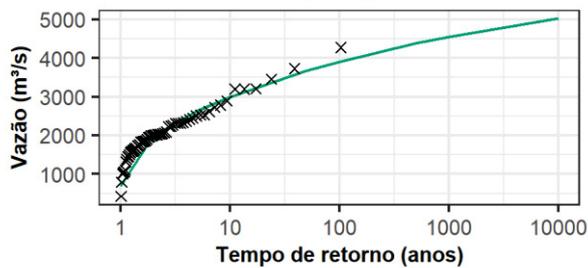
A.S.Oliveira (16)



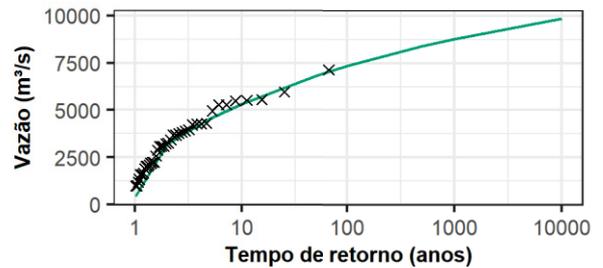
Baixo Iguaçu (81)



Barra Bonita (237)

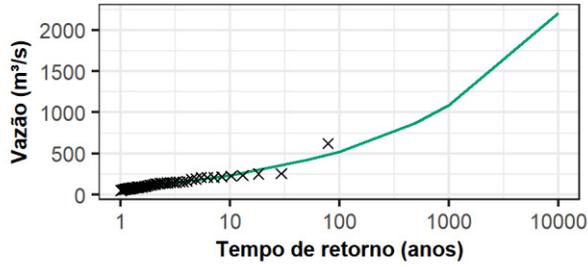


Barra Grande (215)

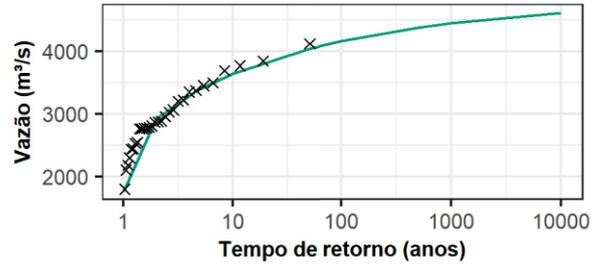


Legenda — Vazão de Projeto - Série Truncada × Vazão Máxima - Série Truncada

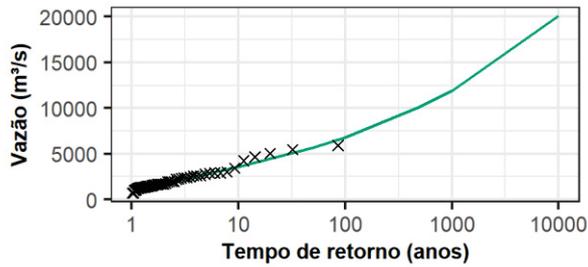
Billings (118)



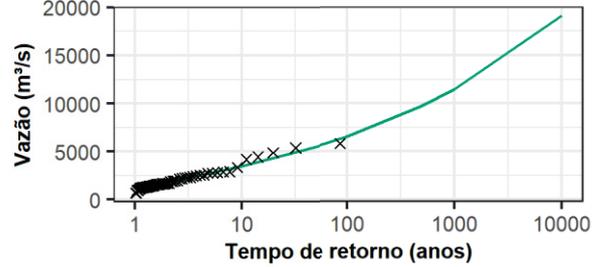
Cach. Caldeirão (204)



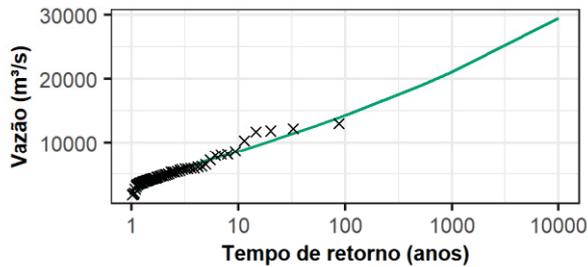
Canoas I (52)



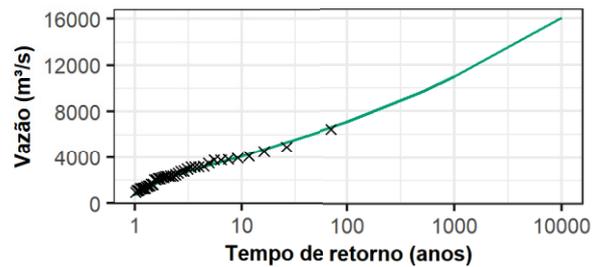
Canoas II (51)



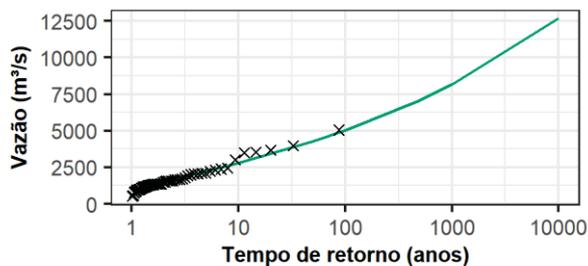
Capivara (61)



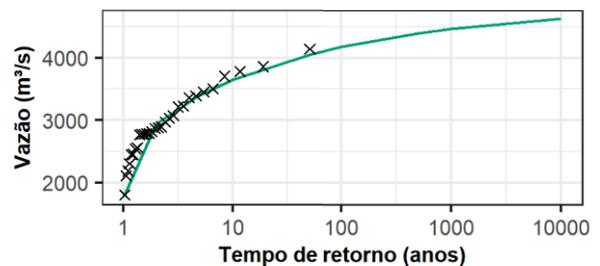
Castro Alves (98)



Chavantes (49)

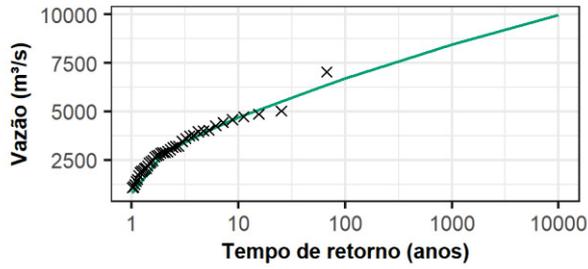


Coaracy Nun. (280)

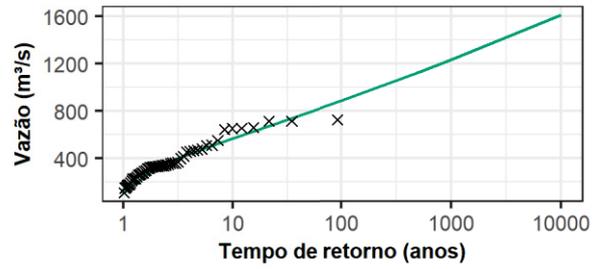


Legenda — Vazão de Projeto - Série Truncada × Vazão Máxima - Série Truncada

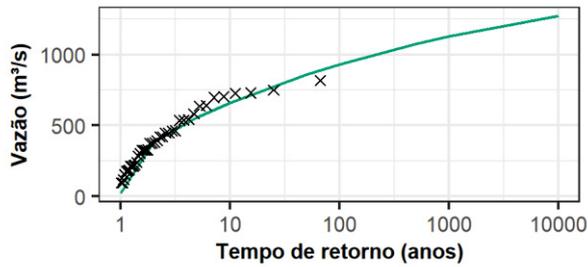
D. Francisca (114)



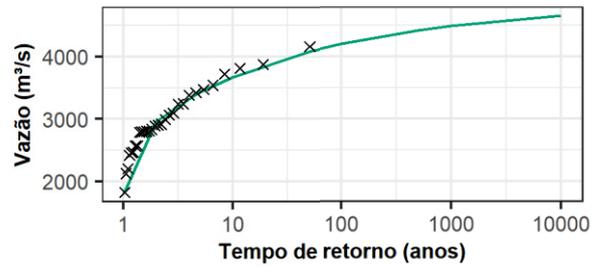
E. da Cunha (15)



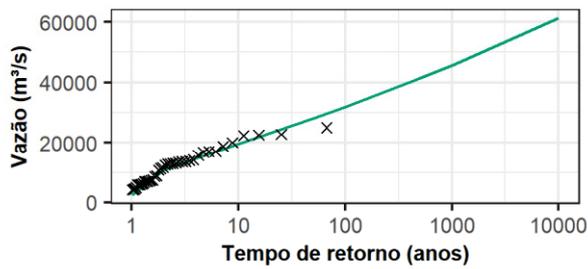
Ernestina (110)



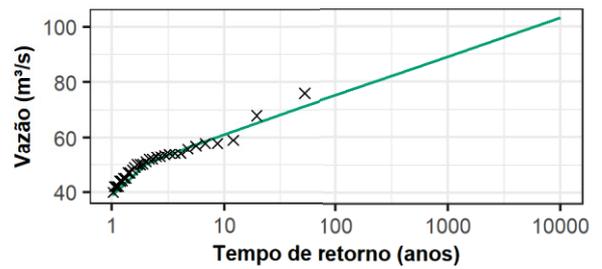
Ferreira Gomes (297)



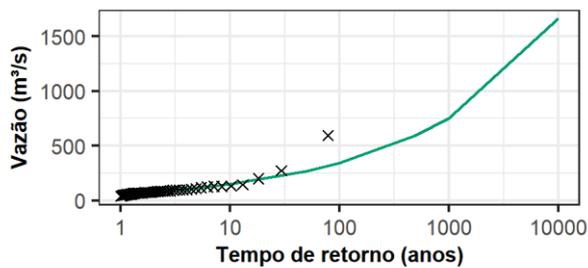
Foz Chapecó (94)



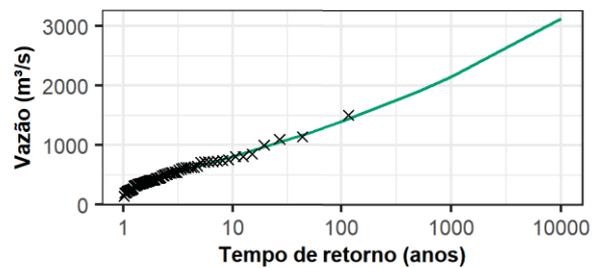
Guaporé (296)



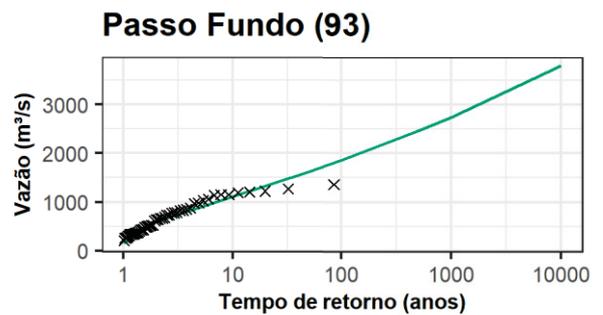
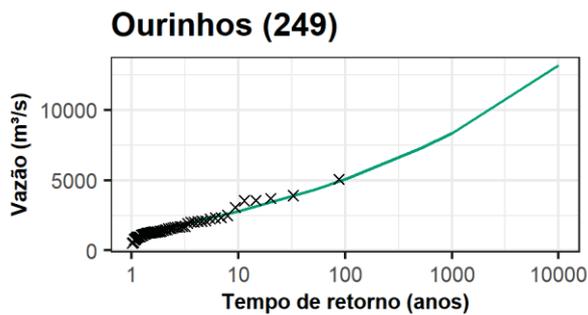
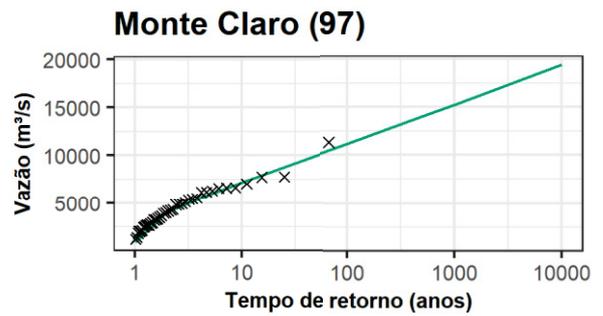
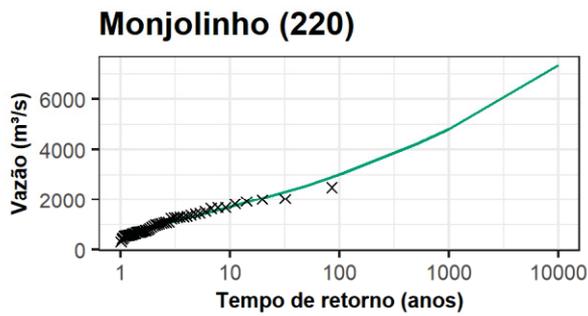
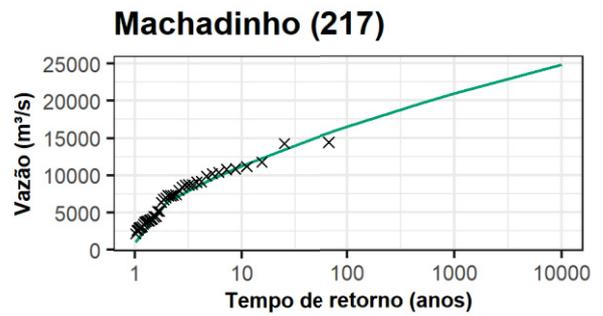
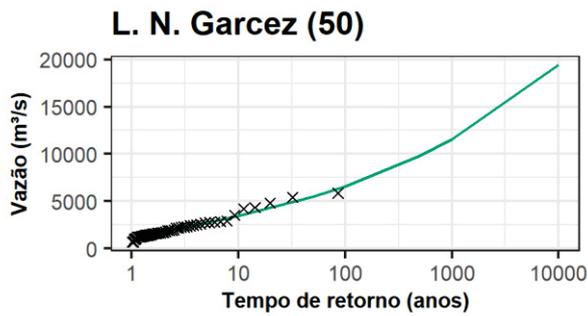
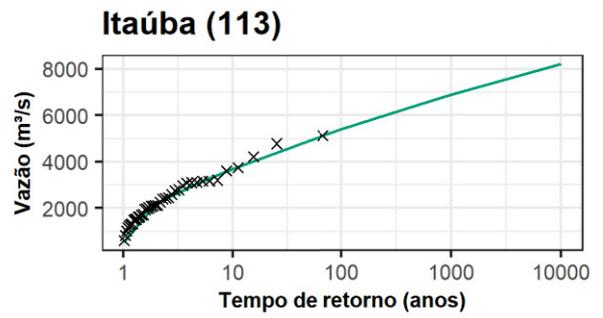
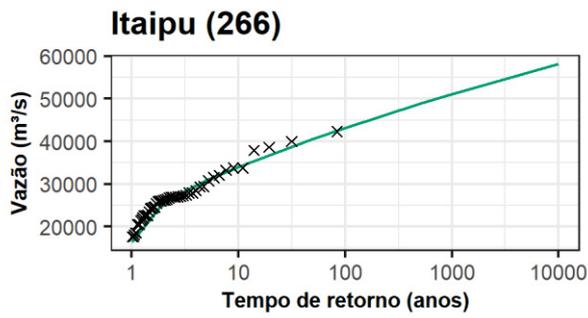
Guarapiranga (117)



Guilman-Amorim (262)

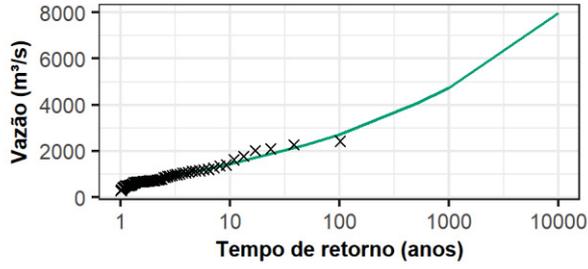


Legenda — Vazão de Projeto - Série Truncada × Vazão Máxima - Série Truncada

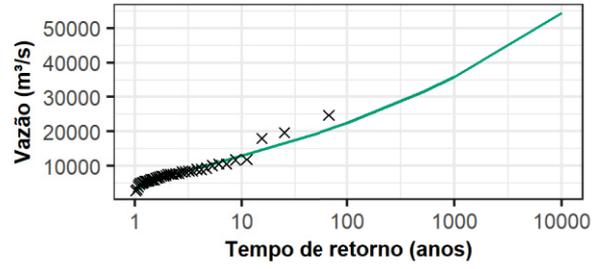


Legenda — Vazão de Projeto - Série Truncada × Vazão Máxima - Série Truncada

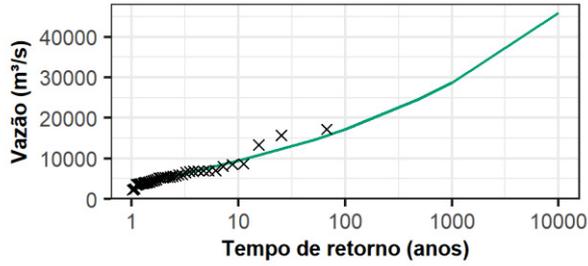
Piraju (48)



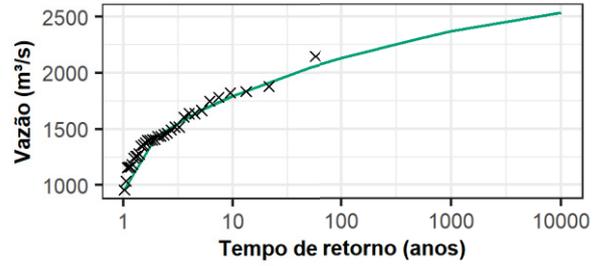
Salto Caxias (222)



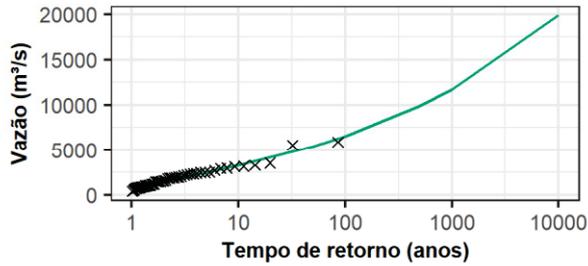
Salto Osório (78)



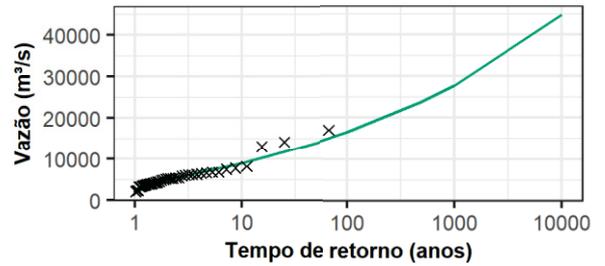
Samuel (279)



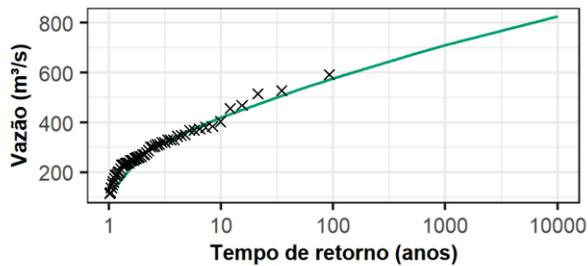
São Roque (88)



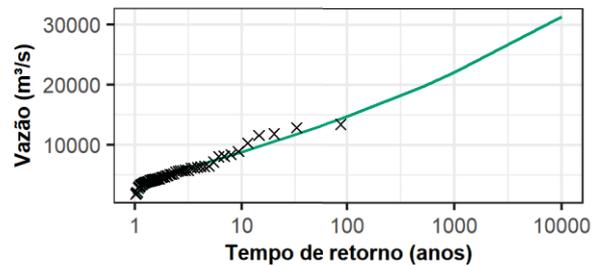
Salto Santiago (77)



Sobragi (198)



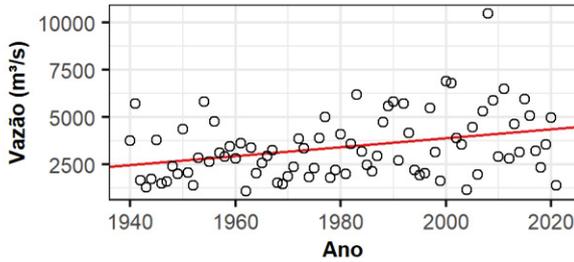
Taquaruçu (62)



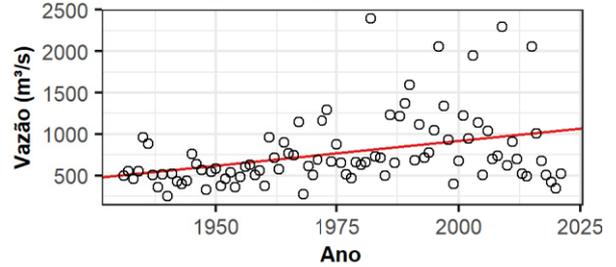
Legenda — Vazão de Projeto - Série Truncada × Vazão Máxima - Série Truncada

APÊNDICE 5 – REGRESSÃO LINEAR SIMPLES - UHE'S ESTATISTICAMENTE NÃO ESTACIONÁRIAS

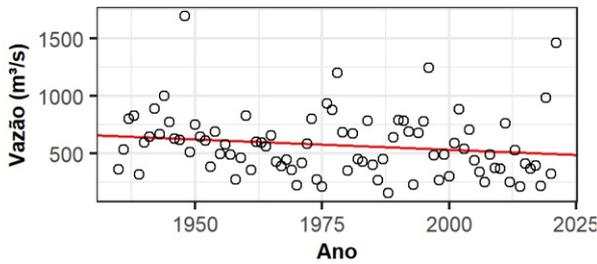
14 de Julho (284)



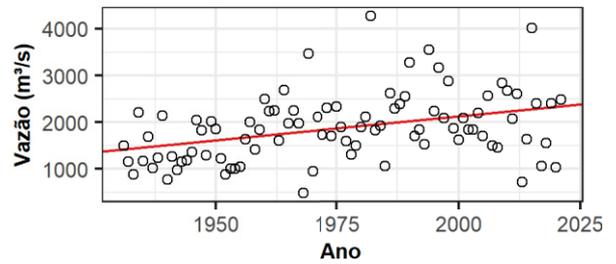
A.A. Laydner (47)



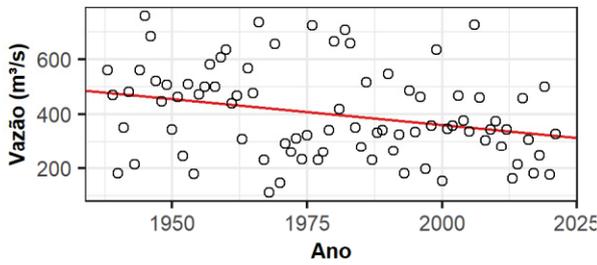
A.Dias+S.Car (183)



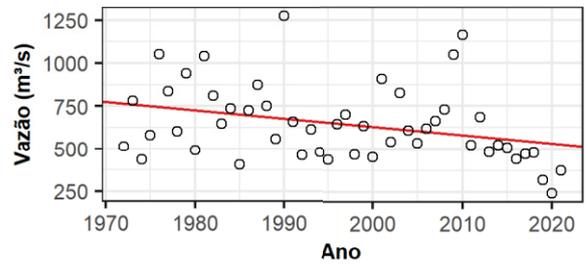
A.S. Lima (238)



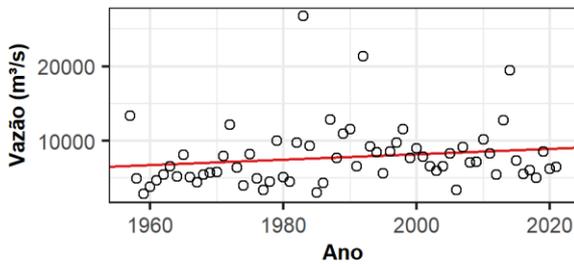
A.S.Oliveira (16)



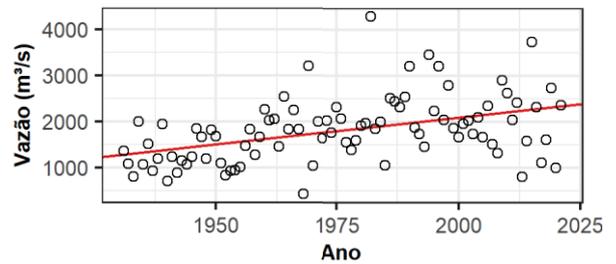
B. Coqueiros (248)



Baixo Iguaçu (81)

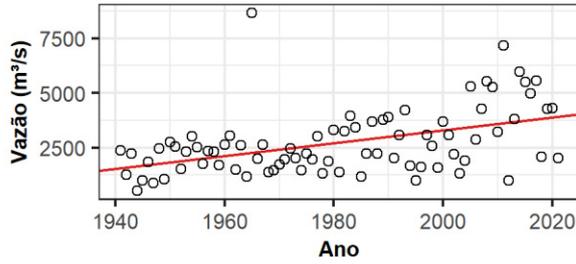


Barra Bonita (237)

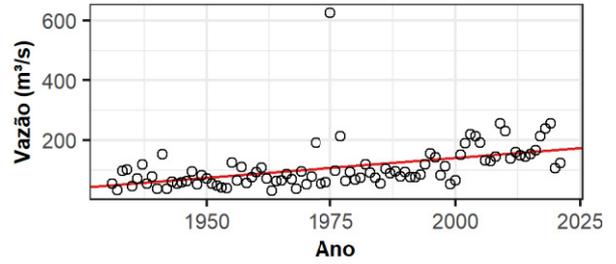


Legenda — Tendência ○ Vazão Máxima Anual

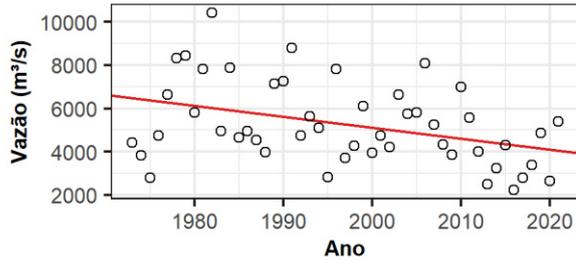
Barra Grande (215)



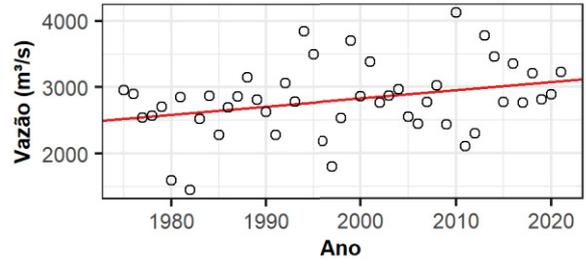
Billings (118)



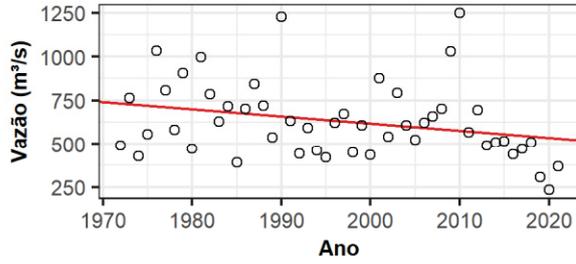
Cach. Dourada (32)



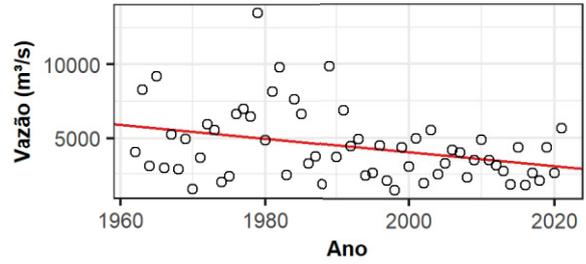
Cach. Caldeirão (204)



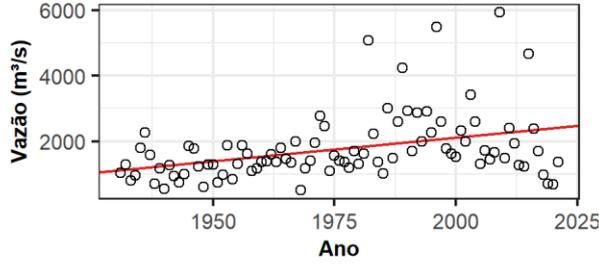
Caçú (247)



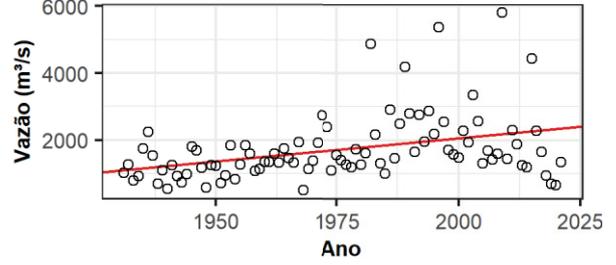
Cana Brava (191)



Canoas I (52)

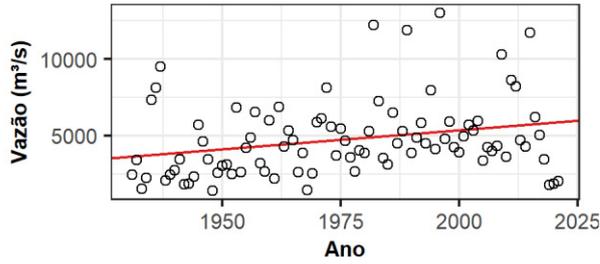


Canoas II (51)

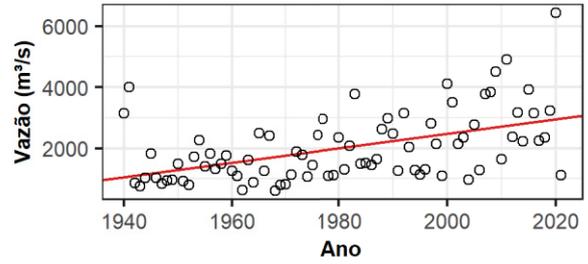


Legenda Tendência Vazão Máxima Anual

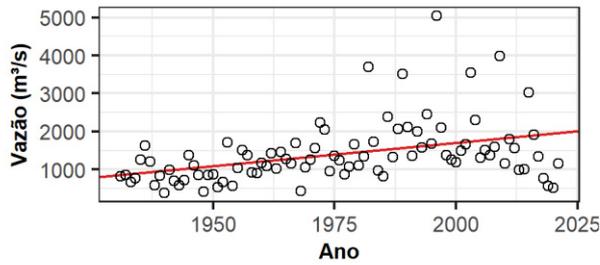
Capivara (61)



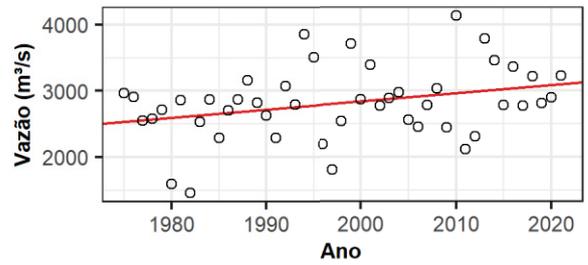
Castro Alves (98)



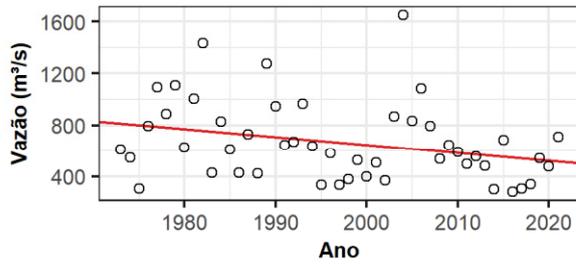
Chavantes (49)



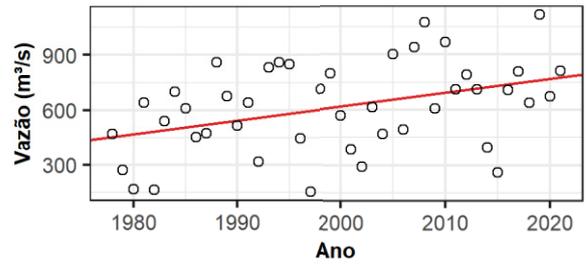
Coaracy Nun. (280)



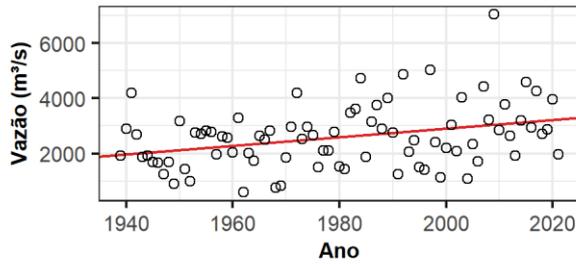
Corumbá III (23)



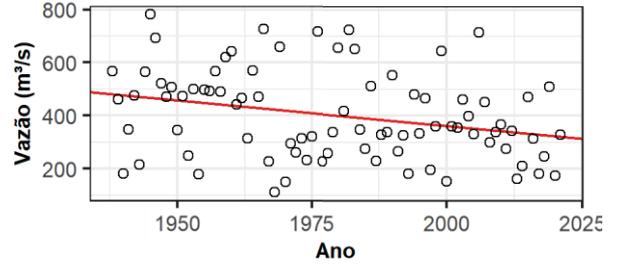
Curuá-Uná (277)



D. Francisca (114)

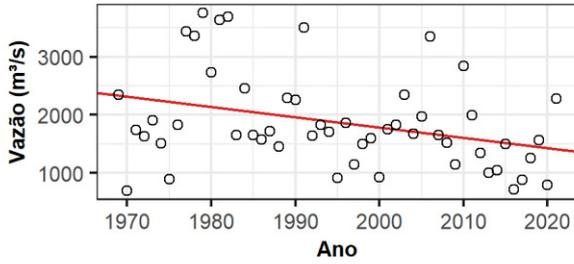


E. da Cunha (15)

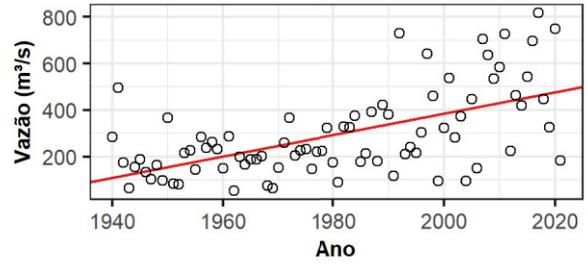


Legenda Tendência Vazão Máxima Anual

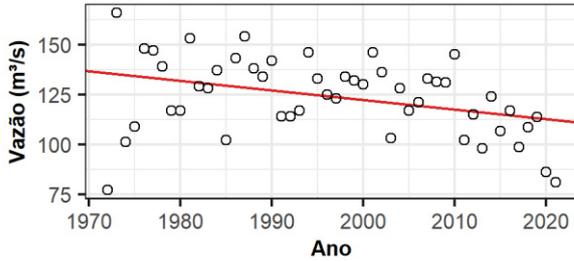
Emborcação (24)



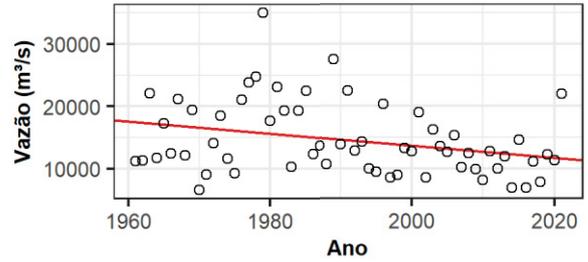
Ernestina (110)



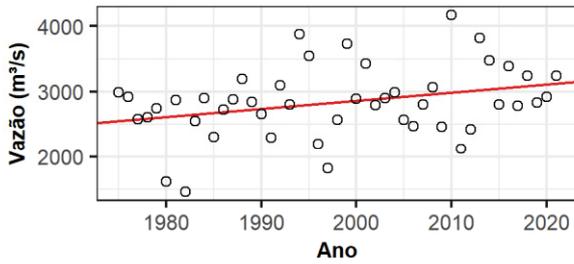
Espora (99)



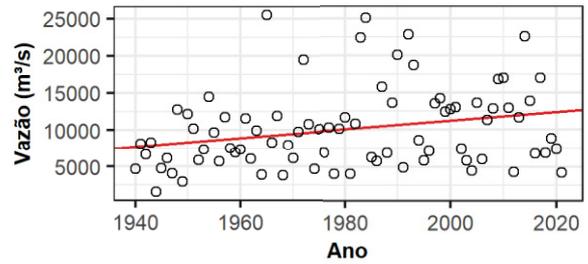
Estreito Tocantins (271)



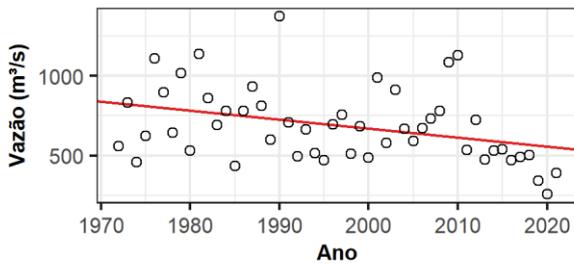
Ferreira Gomes (297)



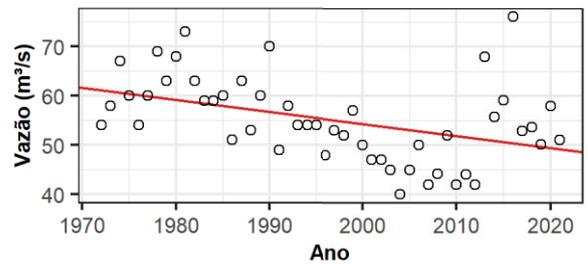
Foz Chapecó (94)



Foz do Rio Claro (261)

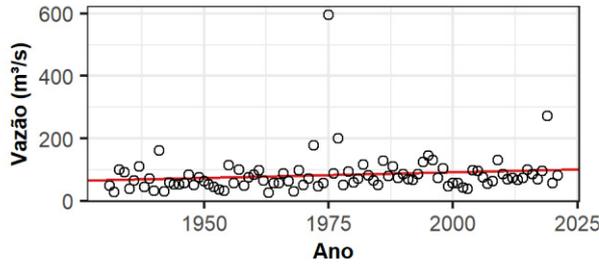


Guaporé (296)

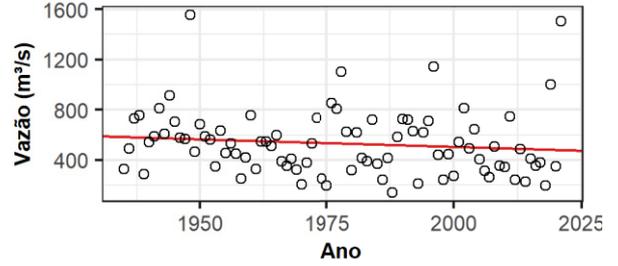


Legenda  Tendência  Vazão Máxima Anual

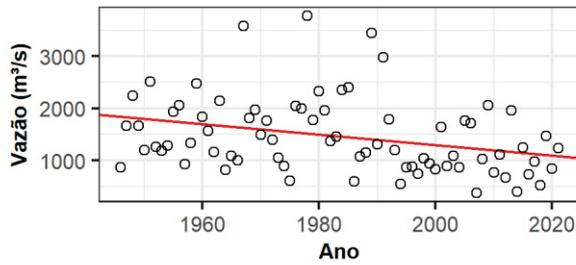
Guarapiranga (117)



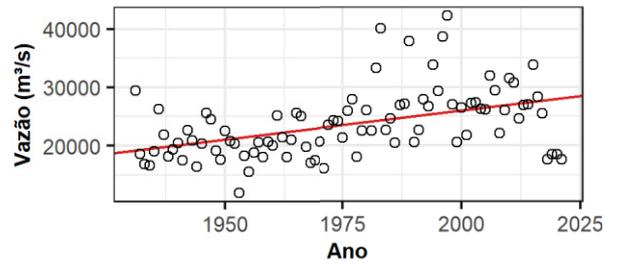
Guilman-Amorim (262)



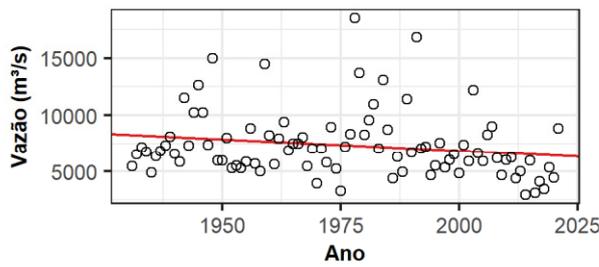
Irapé (255)



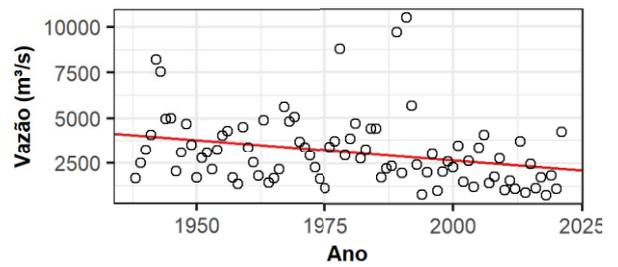
Itaipu (266)



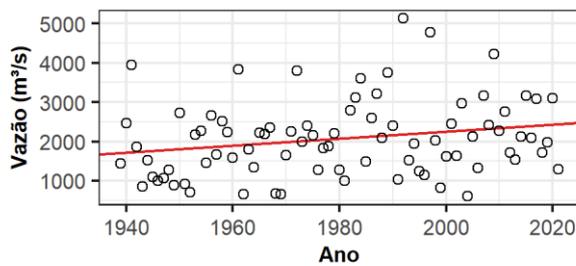
Itaparica (172)



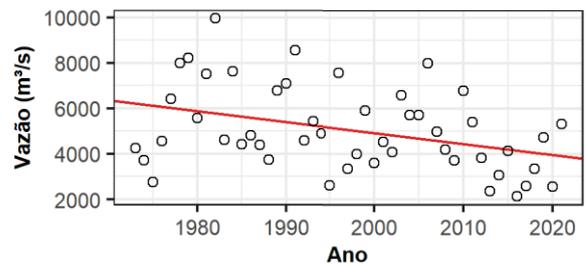
Itapebi (188)



Itaúba (113)

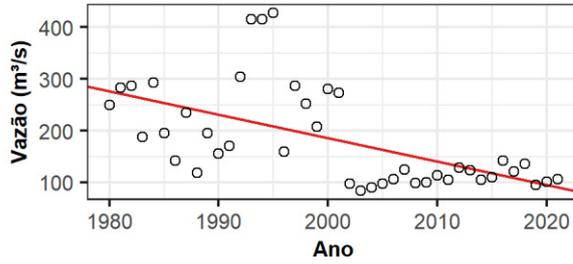


Itumbiara (31)

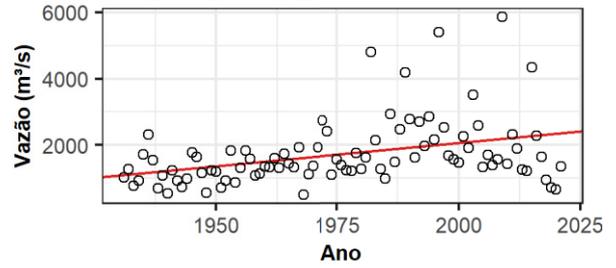


Legenda Tendência Vazão Máxima Anual

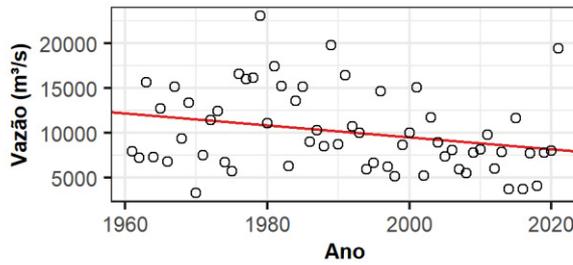
Jauru (295)



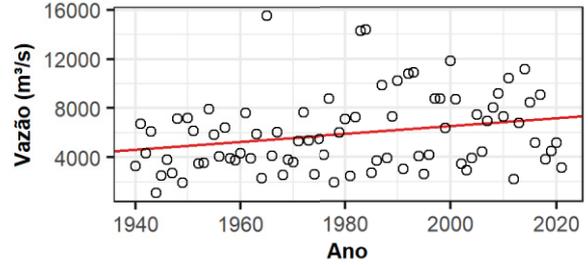
L. N. Garcez (50)



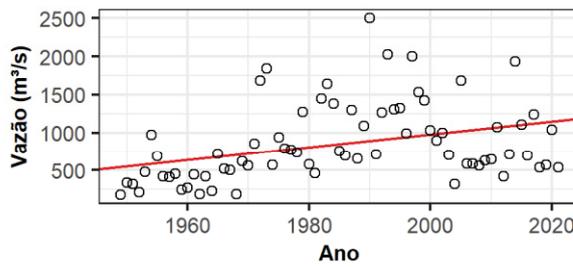
Lajeado (273)



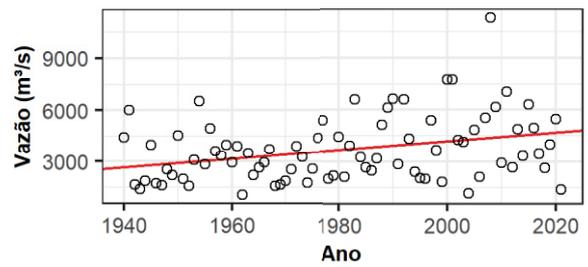
Machadinho (217)



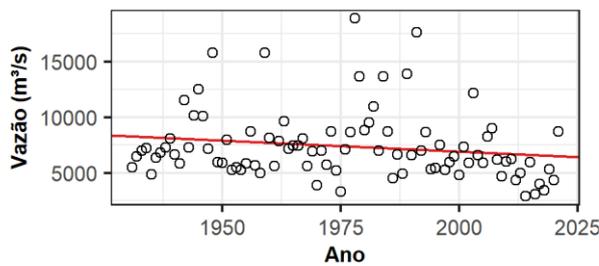
Monjolinho (220)



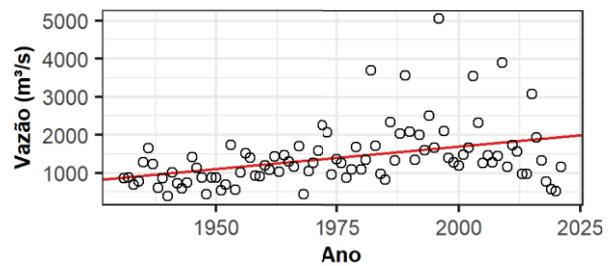
Monte Claro (97)



Moxotó (173)

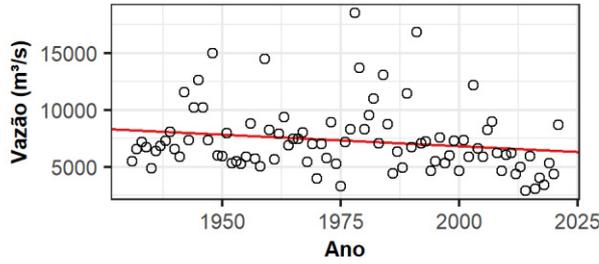


Ourinhos (249)

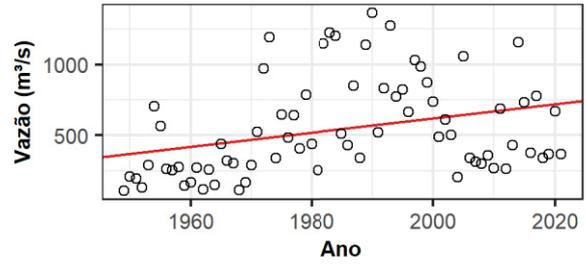


Legenda  Tendência  Vazão Máxima Anual

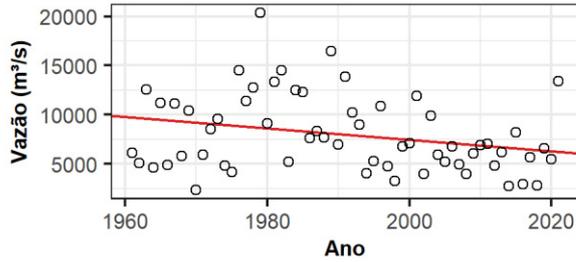
P. Afonso (175)



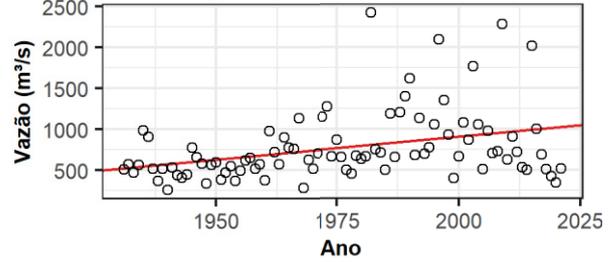
Passo Fundo (93)



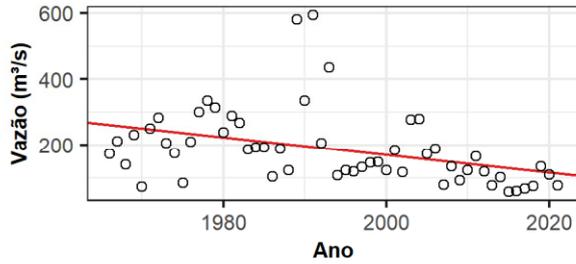
Peixe Angical (257)



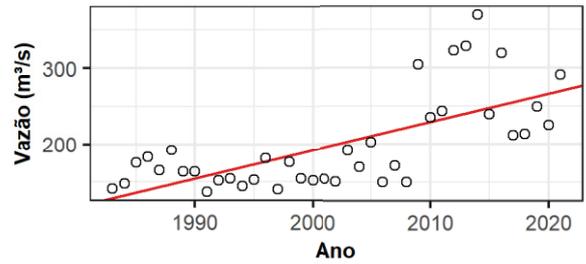
Piraju (48)



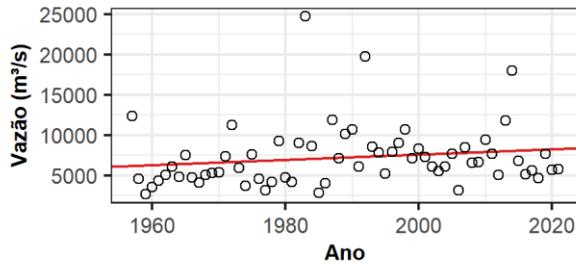
Queimado (158)



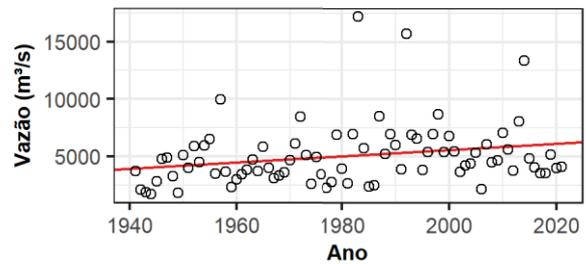
Rondon II (145)



Salto Caxias (222)

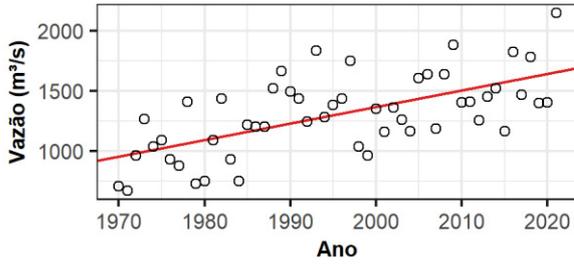


Salto Osório (78)

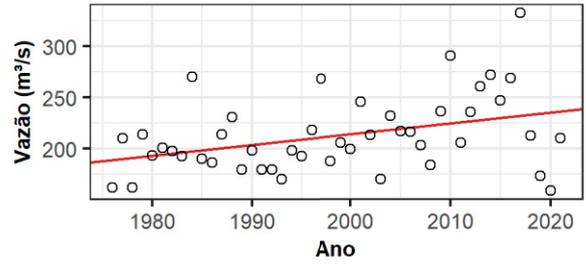


Legenda Tendência Vazão Máxima Anual

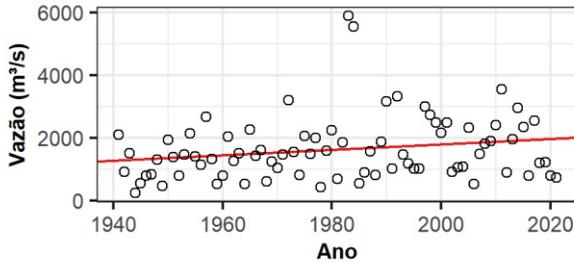
Samuel (279)



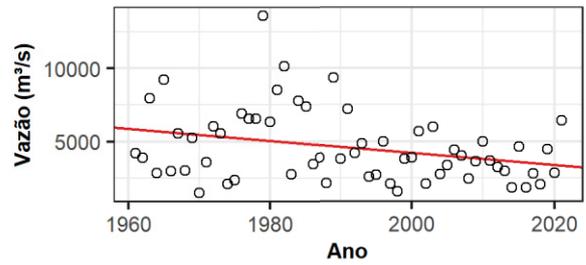
São Domingos (154)



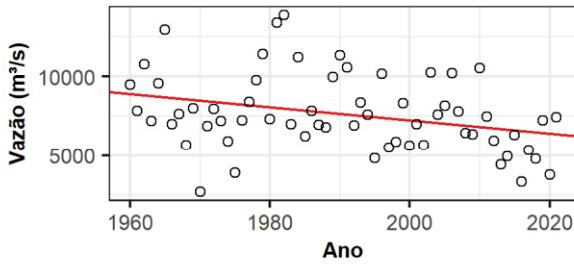
São Roque (88)



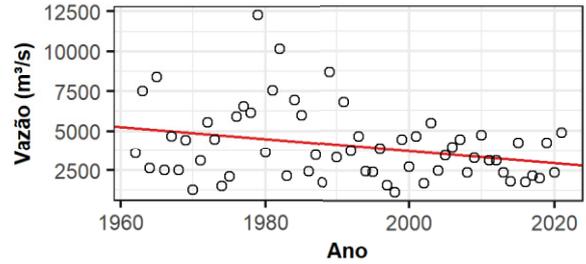
São Salvador (253)



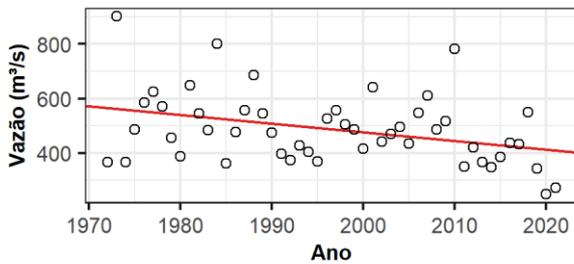
São Simão (33)



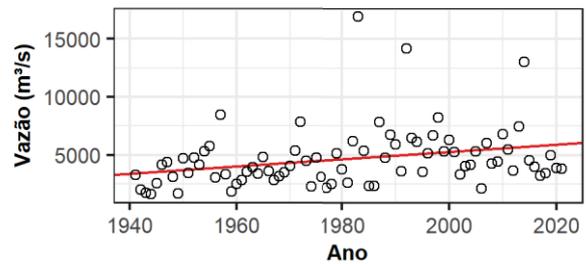
Serra Mesa (270)



Salto Verdinho (241)

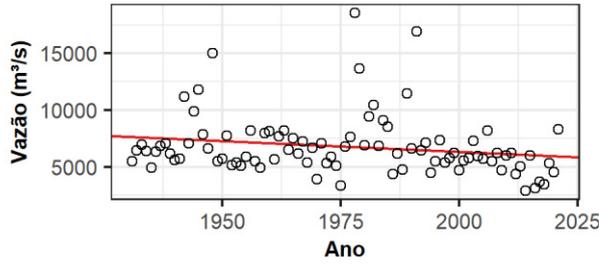


Salto Santiago (77)

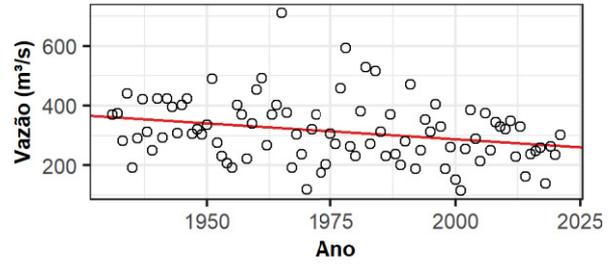


Legenda  Tendência  Vazão Máxima Anual

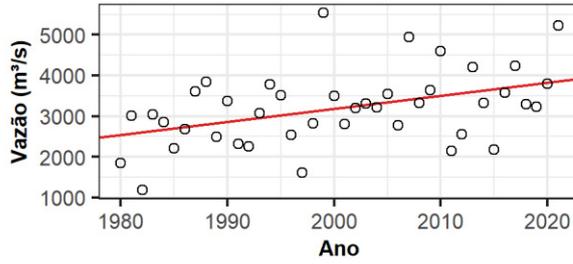
Sobradinho (169)



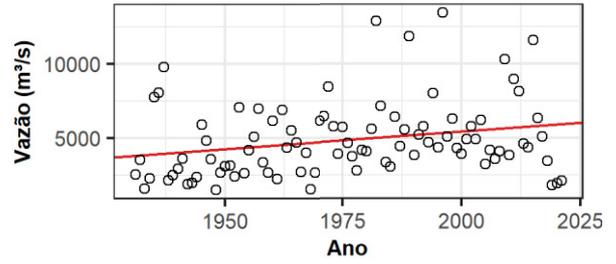
Sobragi (198)



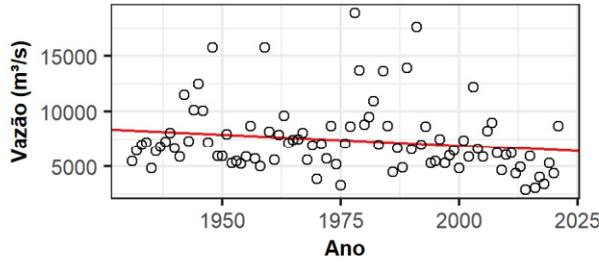
Santo Ant Jari (290)



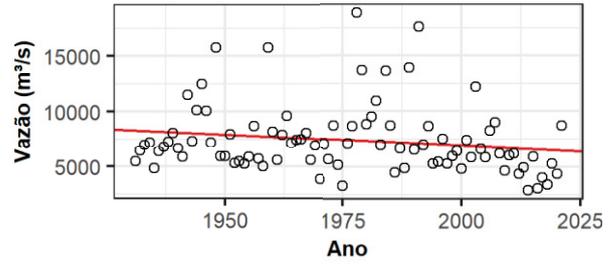
Taquaruçu (62)



Xingó (178)

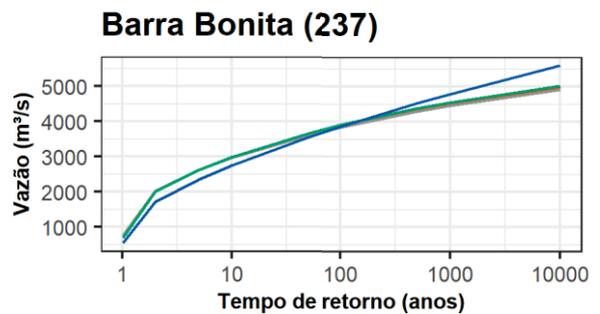
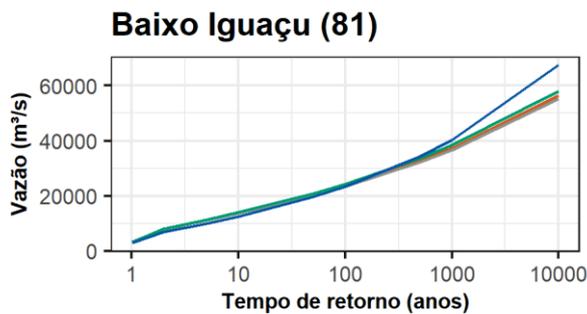
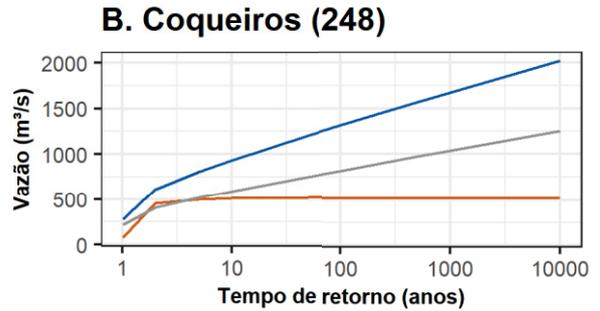
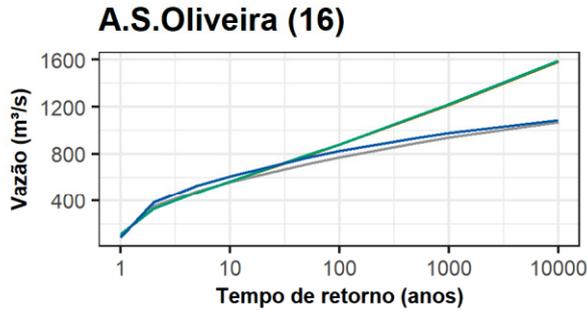
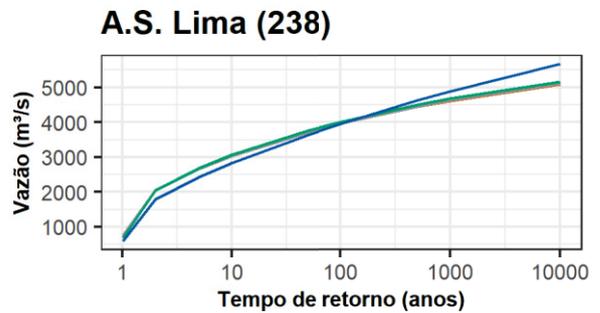
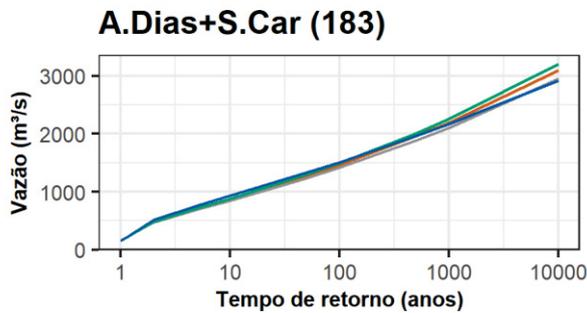
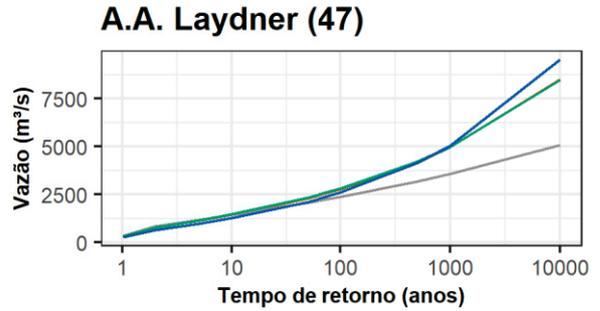
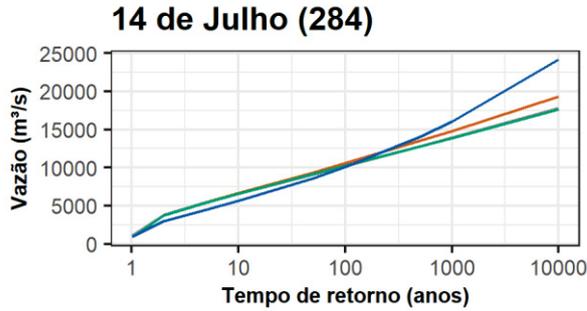


Compl. P. Af. Moxotó (176)

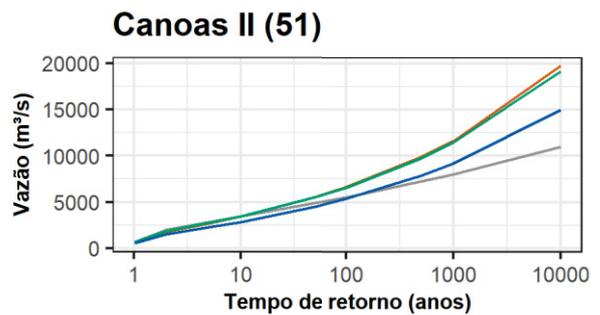
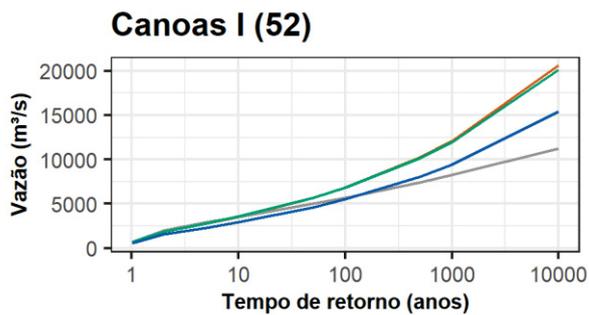
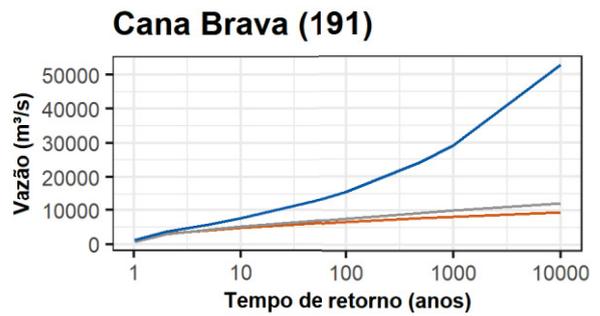
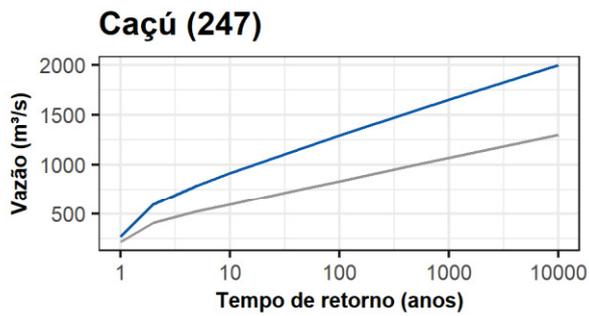
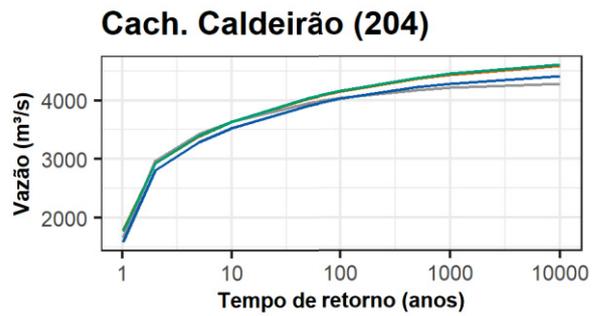
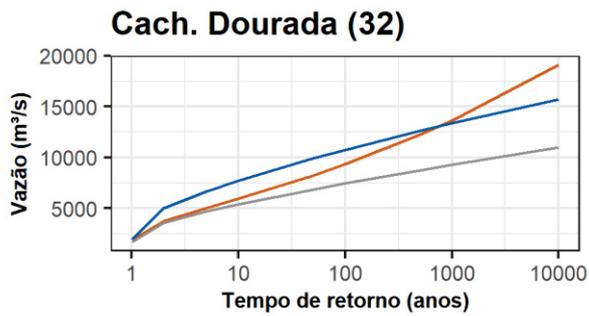
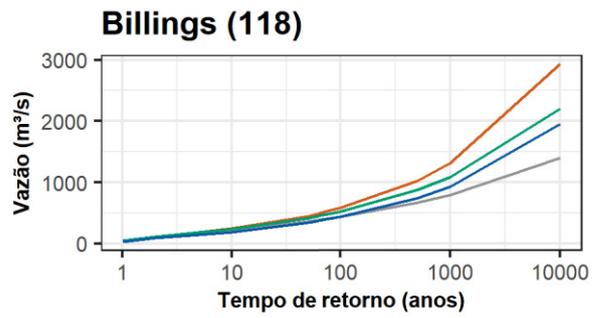
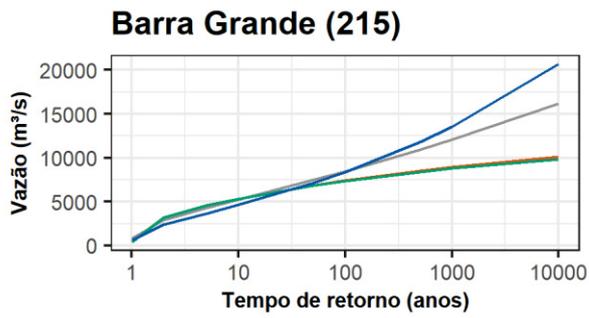


Legenda  Tendência  Vazão Máxima Anual

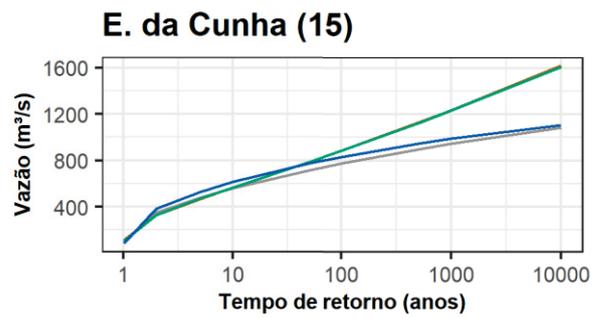
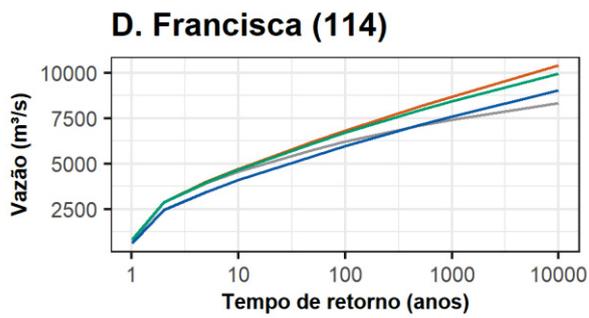
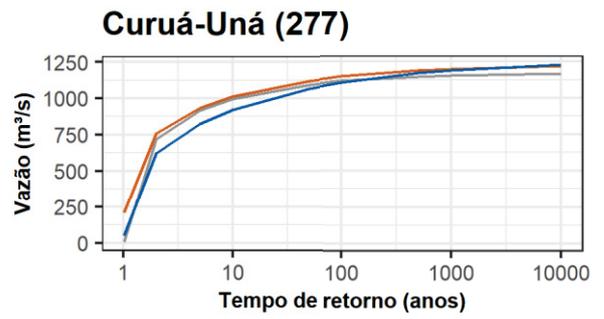
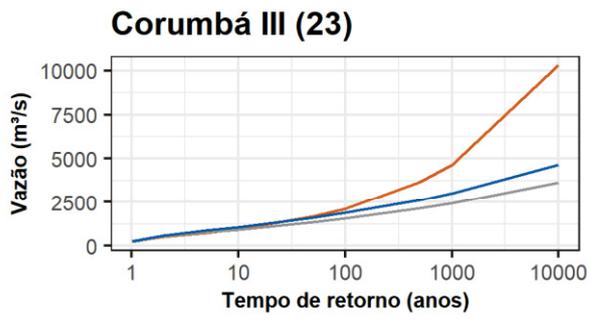
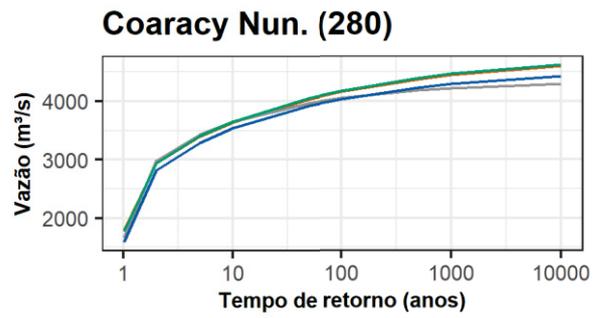
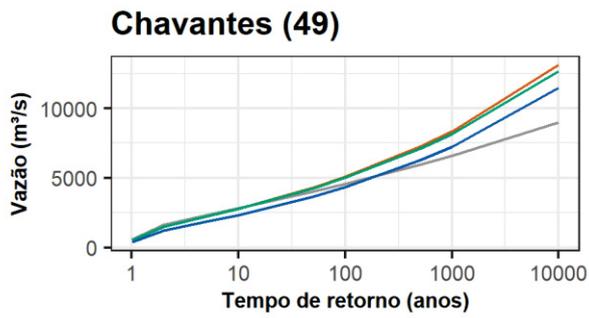
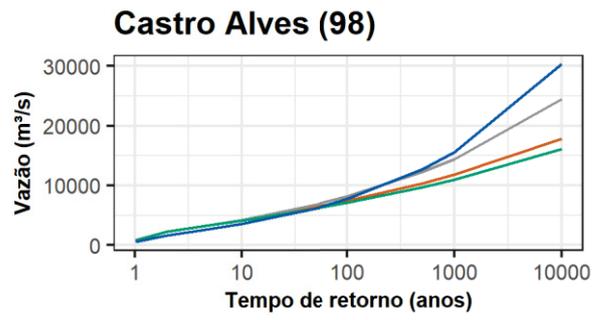
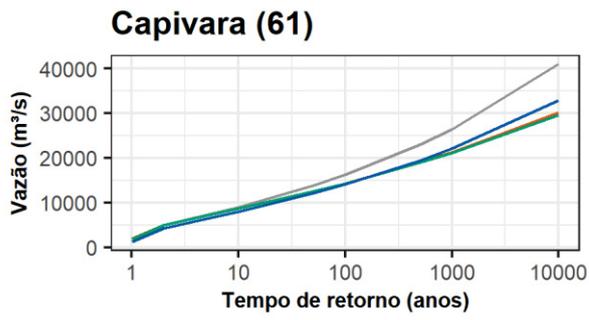
APÊNDICE 6 – COMPARATIVO ENTRE VAZÕES DE PROJETO EM CONTEXTO NÃO ESTACIONÁRIO



Legenda — Correção - Método EQM — Correção - Vazão Acumulada — Série Histórica — Série Truncada

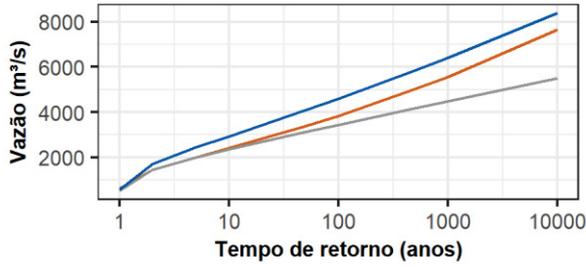


Legenda — Correção - Método EQM — Correção - Vazão Acumulada — Série Histórica — Série Truncada

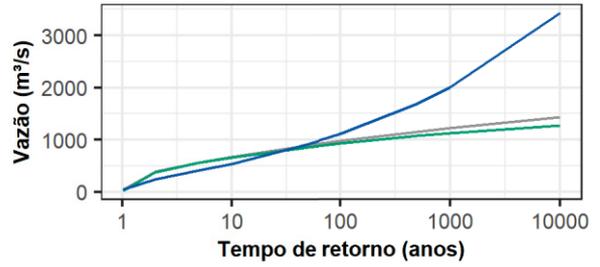


Legenda — Correção - Método EQM — Correção - Vazão Acumulada — Série Histórica — Série Truncada

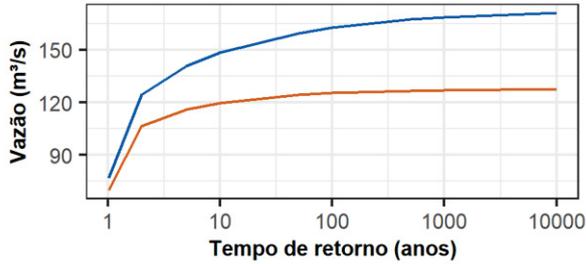
Emborcação (24)



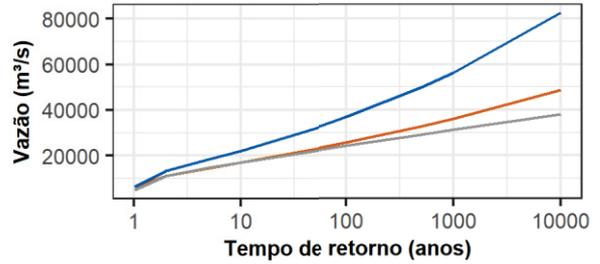
Ernestina (110)



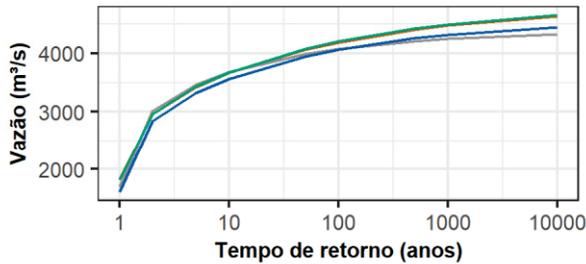
Espora (99)



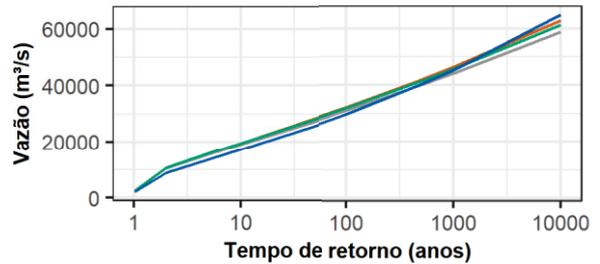
Estreito Tocantins (271)



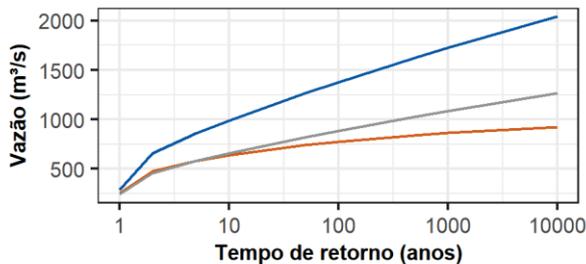
Ferreira Gomes (297)



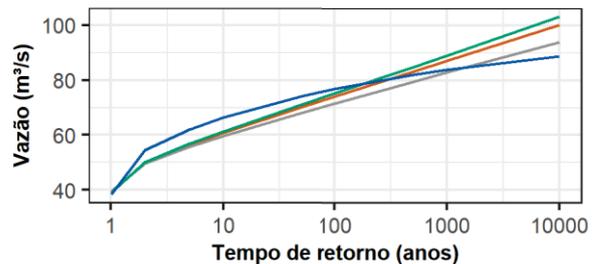
Foz Chapecó (94)



Foz do Rio Claro (261)

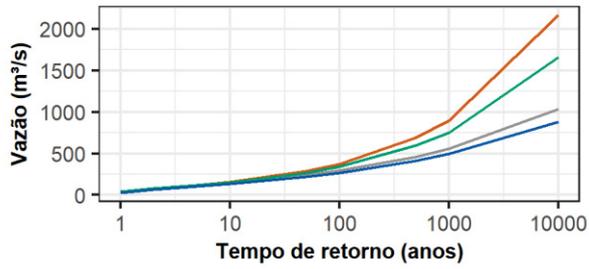


Guaporé (296)

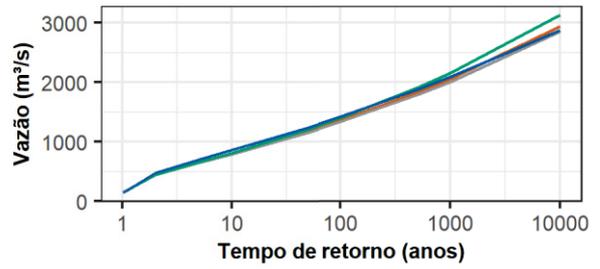


Legenda — Correção - Método EQM — Correção - Vazão Acumulada — Série Histórica — Série Truncada

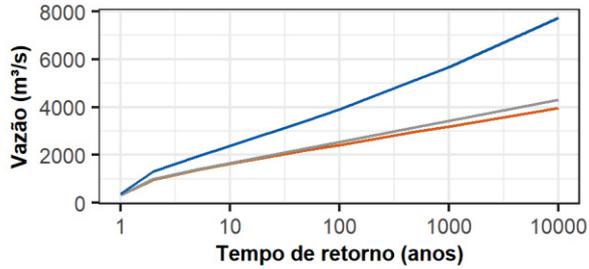
Guarapiranga (117)



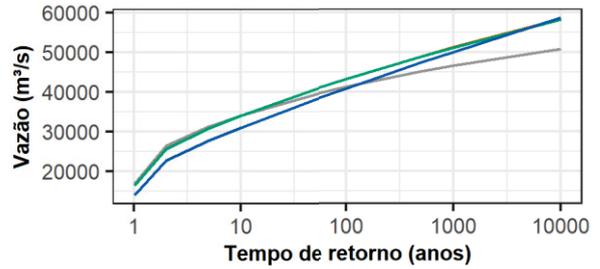
Guilman-Amorim (262)



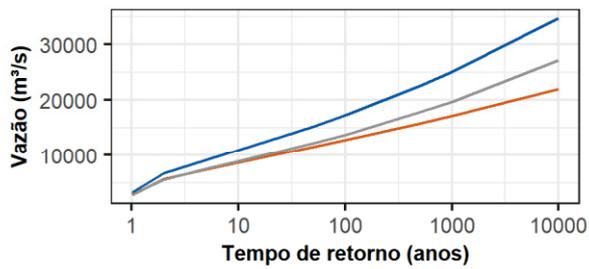
Irapé (255)



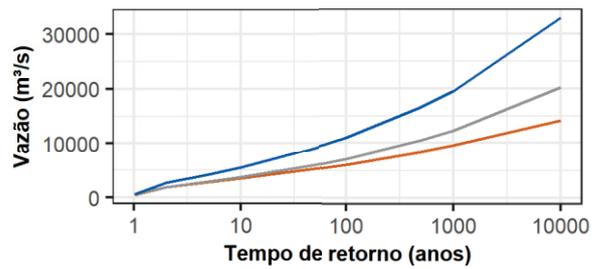
Itaipu (266)



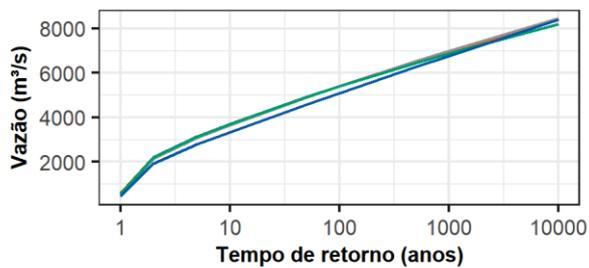
Itaparica (172)



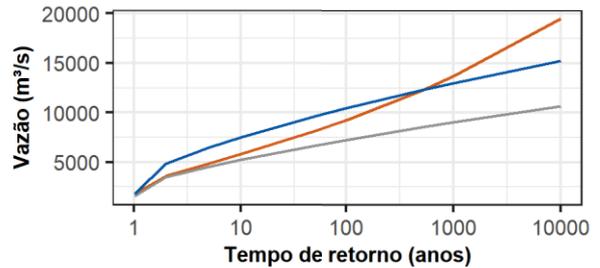
Itapebi (188)



Itaúba (113)



Itumbiara (31)

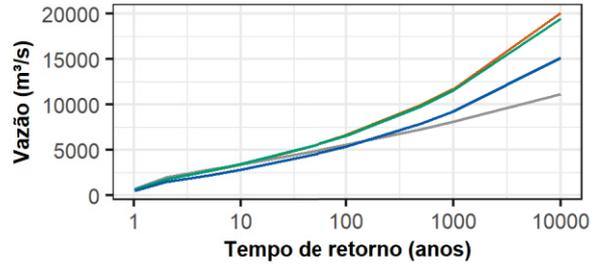


Legenda — Correção - Método EQM — Correção - Vazão Acumulada — Série Histórica — Série Truncada

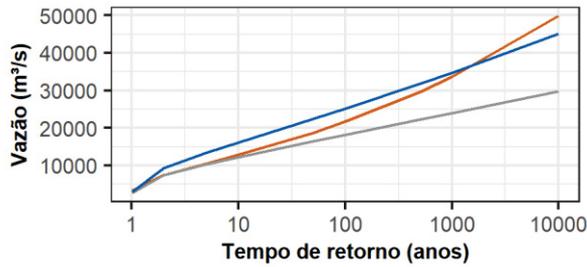
Jauru (295)



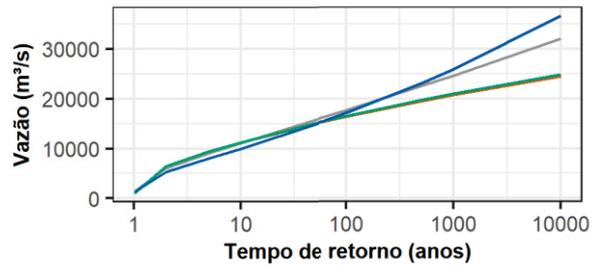
L. N. Garcez (50)



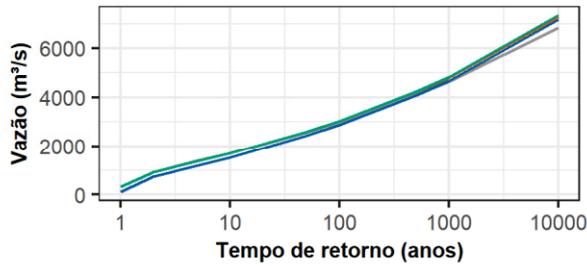
Lajeado (273)



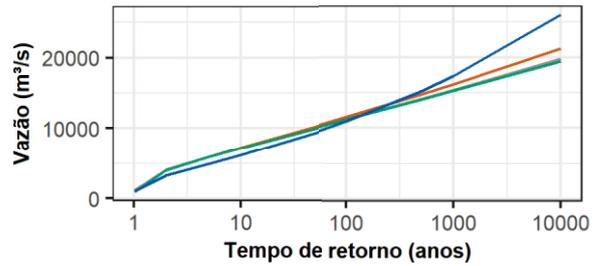
Machadinho (217)



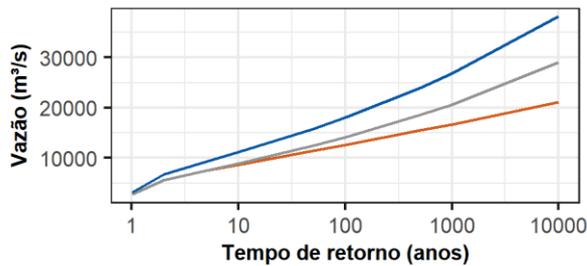
Monjolino (220)



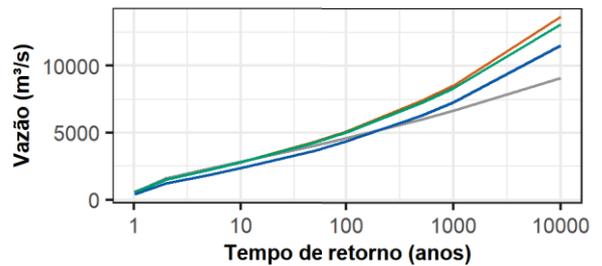
Monte Claro (97)



Moxotó (173)

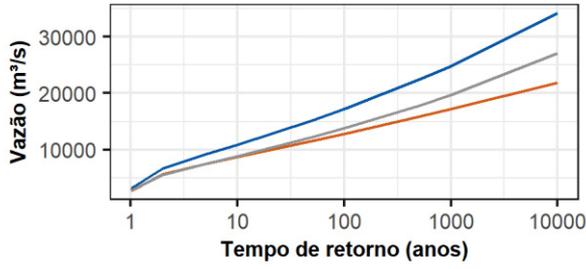


Ourinhos (249)

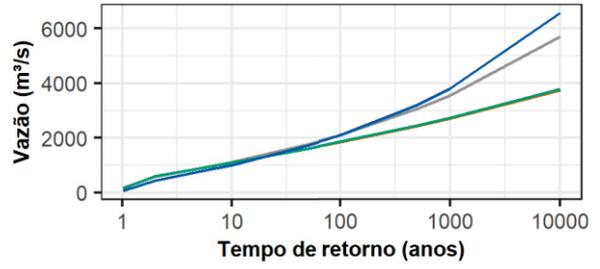


Legenda — Correção - Método EQM — Correção - Vazão Acumulada — Série Histórica — Série Truncada

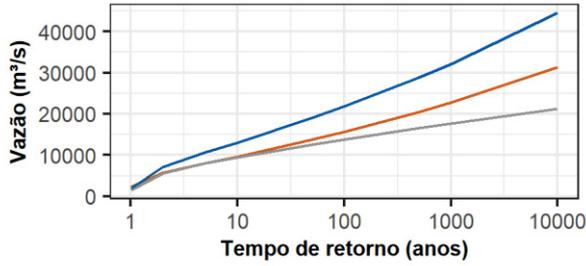
P. Afonso (175)



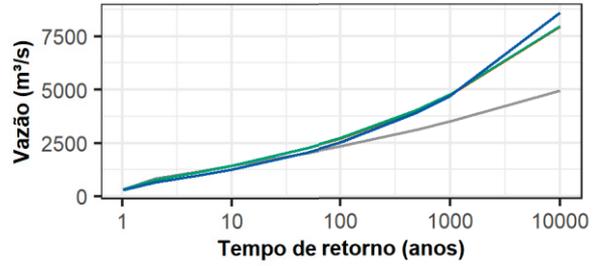
Passo Fundo (93)



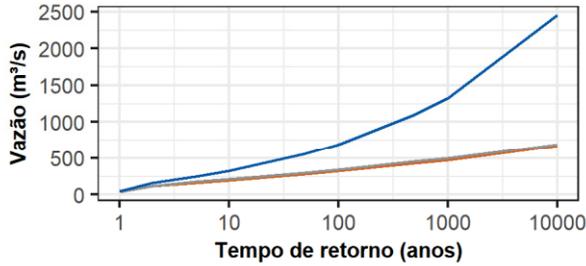
Peixe Angical (257)



Piraju (48)



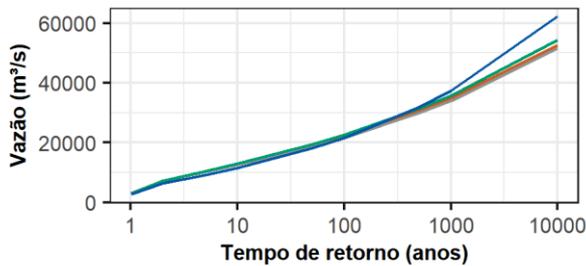
Queimado (158)



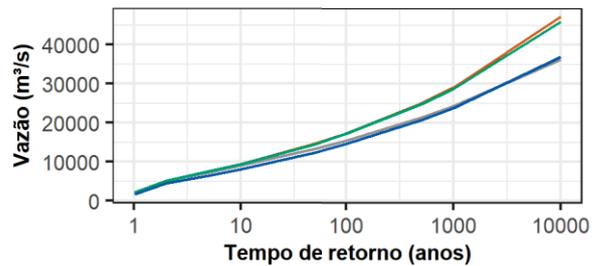
Rondon II (145)



Salto Caxias (222)

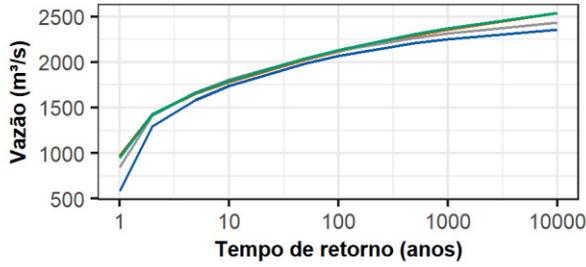


Salto Osório (78)

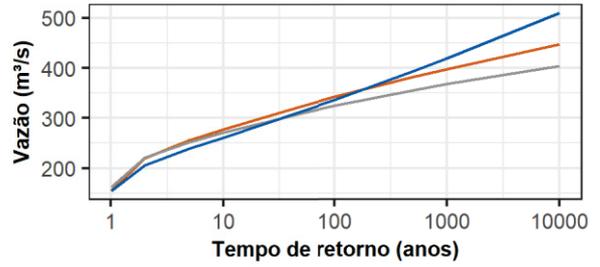


Legenda — Correção - Método EQM — Correção - Vazão Acumulada — Série Histórica — Série Truncada

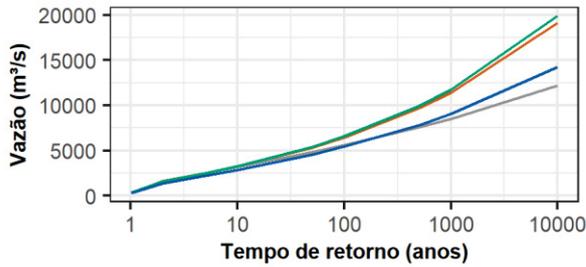
Samuel (279)



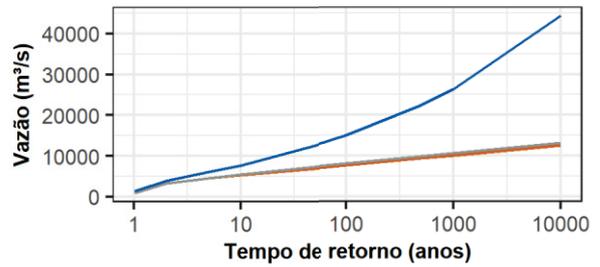
São Domingos (154)



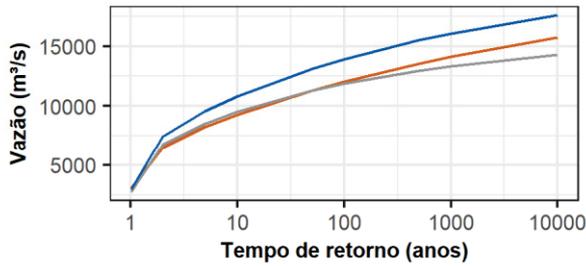
São Roque (88)



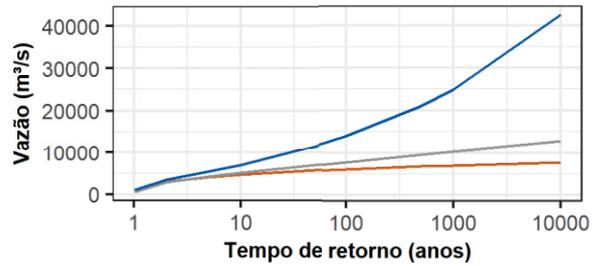
São Salvador (253)



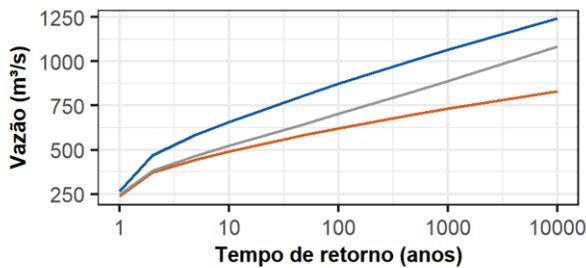
São Simão (33)



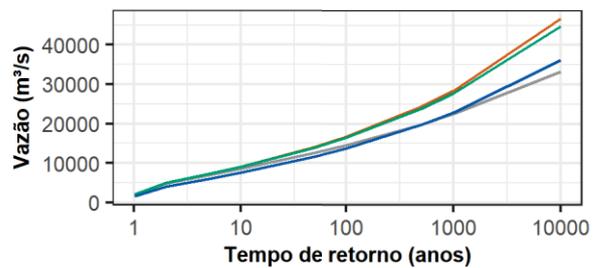
Serra Mesa (270)



Salto Verdinho (241)

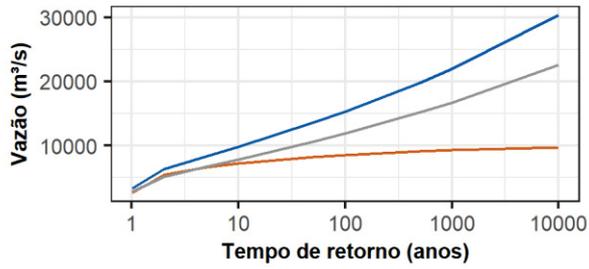


Salto Santiago (77)

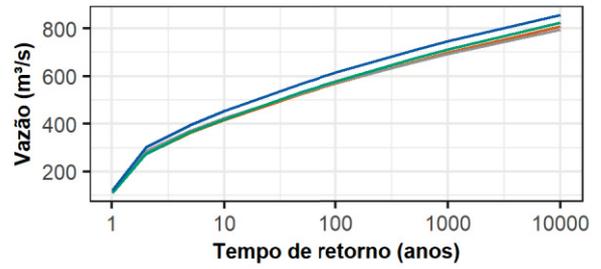


Legenda — Correção - Método EQM — Correção - Vazão Acumulada — Série Histórica — Série Truncada

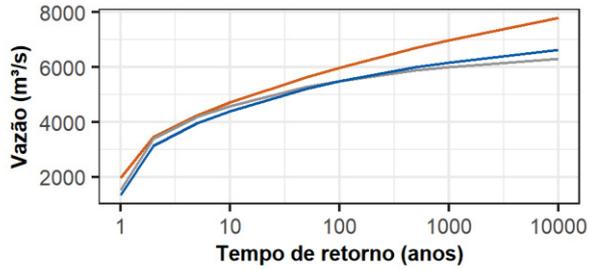
Sobradinho (169)



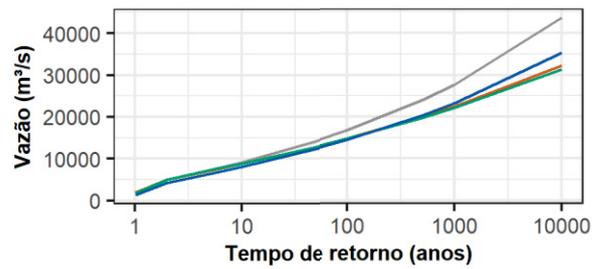
Sobragi (198)



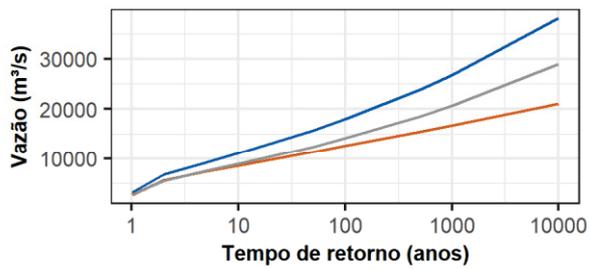
Santo Ant Jari (290)



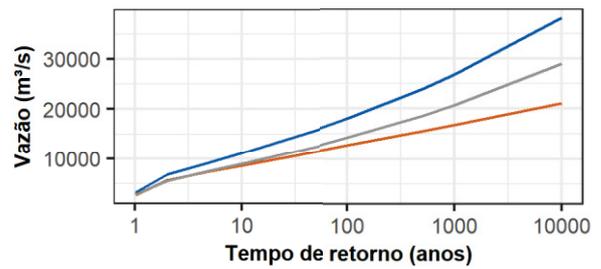
Taquaruçu (62)



Xingó (178)



Compl. P. Af. Moxotó (176)



Legenda — Correção - Método EQM — Correção - Vazão Acumulada — Série Histórica — Série Truncada