



ISSN:1984-2295

Revista Brasileira de Geografia Física

Homepage: www.ufpe.br/rbgfe

Estimação da vazão de projeto de barragens utilizando séries temporais não estacionárias

Leandro Jose Isensee¹, Adilson Pinheiro² e Daniel Henrique Marco Detzel³

¹Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Fundação Universidade Regional de Blumenau, Rua São Paulo, 3250, CEP 89030-080, Blumenau, Santa Catarina. (47) 3321-0200. leandroisensee@gmail.com, ORCID 0000-0002-5021-474X (autor correspondente). ²Professor Titular, Dr., Departamento Engenharia Civil, Fundação Universidade Regional de Blumenau, Rua São Paulo, 3250, CEP 89030-080, Blumenau, Santa Catarina. (47) 3321-0200. pinheiro@furb.br, ORCID 0000-0001-8546-0046. Professor Adjunto, Dr., Departamento de Hidráulica e Saneamento, Universidade Federal do Paraná, Av. Cel. Francisco Heráclito dos Santos, 100, CEP 81531-980, Curitiba, Paraná. (41) 3360-5000. detzel@ufpr.br, ORCID 0000-0003-2841-6502

Artigo recebido em 22/02/2021 e aceito em 29/07/2021

RESUMO

Tendências crescentes nas estatísticas de vazões dos rios têm sido detectadas em séries temporais no Brasil e no mundo. Devido as tendências, especialmente nas vazões máximas, há preocupação de que estruturas hidráulicas, como barragens, possam estar com sua segurança comprometida. Assim, o objetivo deste estudo é estimar a vazão de projeto de série temporal não estacionária para baixa probabilidades (TR milenar), comparando seu valor com a vazão de projeto do vertedouro da barragem existente. A determinação de uma variável para baixa probabilidades, como a vazão de projeto, utiliza métodos com diversas aplicações nas ciências ambientais, como mapas de inundação e equações de intensidade, duração e frequência. Este estudo foi aplicado na estação fluviométrica Abelardo Luz e na barragem da PCH Ludes, localizadas no Estado de Santa Catarina. Doze séries temporais de máximos diários anuais foram construídas, variando o ano hidrológico. Os testes estatísticos Mann-Kendall e Pettit foram aplicados para avaliar a estacionariedade. Aplicou-se as distribuições GEV e Gumbel para estimar a vazão de projeto teórica, comparando-a com a vazão de projeto real. Os resultados indicam que as séries temporais geradas são não estacionárias, com pontos de mudança detectados. O modelo GEV se adequou melhor as séries temporais, com parâmetro forma positivo. Em relação a vazão de projeto, dependendo do modelo considerado, o fator de segurança dessa barragem apresentou redução. Percebeu-se também que a qualidade dos dados, bem como seu comprimento, são fatores decisivos para estimar a vazão de projeto com menor grau de incerteza.

Dams design flow estimation using non-stationary time series

ABSTRACT

Increasing trends in streamflow statistics have been detected in time series in Brazil and worldwide. Due to trends, especially at maximum streamflow, there is concern that hydraulic structures, such as dams, may have their safety compromised. Therefore, the objective of this study is to estimate the design flow of a non-stationary time series for low probabilities (millennial TR), comparing its value with the design flow of the existing dam spillway. The determination of a variable for low probabilities, such as the project flow, uses methods with several applications in environmental sciences, such as flood maps and intensity, duration, and frequency curves. This study was applied at the gauging station Abelardo Luz and PCH Ludes dam, located in the state of Santa Catarina. Twelve time series of annual maximum daily streamflow were built, varying the hydrological year. Mann-Kendall and Pettit statistical tests were applied to assess stationarity. The GEV and Gumbel distributions were applied to estimate the theoretical design flow, comparing it with the actual design flow. The results indicate that the time series generated are non-stationary, with change-points detected. The GEV model was better suited to the time series, with a positive shape parameter. In relation to the project flow, depending on the model considered, the safety factor of this dam decreased. It was also noticed that the quality of the data, as well as its length, are decisive factors for estimating the design flow with a lower degree of uncertainty. Keywords: Dam safety, design flow, stationarity, maximum streamflow time series.

Introdução

A gestão sustentável do uso da água é um movimento crescente em todo mundo (Arnell e

Chunzhen, 2018). A água é um bem público, devendo ser usada de maneira racional e segura (Dalcin e Marques, 2019). Um importante uso da

água no Brasil é a geração hidroelétrica (Lira e Cardoso, 2018). Essa geração se dá pela construção de barragens, sendo muitas vezes associadas a grandes estruturas de contenção de água.

Estima-se que possam existir mais de 170 mil barragens no território brasileiro, com base nos espelhos de água artificiais registrados (SNISB, 2019), sendo estruturas passíveis de falhas (François et al., 2019), tornando-se necessário investir na verificação de sua segurança (Cassalho et al., 2017; Franzke e Czapryna, 2020). Segundo a Política Nacional de Segurança de Barragens (Brasil, 2020), devem ser realizadas revisões periódicas sobre a segurança das barragens, do estado da arte e dos dados hidrológicos, visando manter os padrões de segurança. Portanto, mais do que interesse científico, investigar as séries temporais de vazões deve ser uma obrigação dos gestores destas estruturas.

Os recentes rompimentos de barragens e os impactos por estes ocasionados, demonstram os riscos de um eventual rompimento destas estruturas (Paiva et al., 2021). O extravasamento pela crista, ou galgamento, é uma importante causa de falhas em barragens no Brasil e no mundo (SNISB, 2019; ICOLD, 2019), sendo essa falha associada à vazão de projeto e consequentemente ao dimensionamento do vertedouro. A vazão de projeto pode ser definida como a vazão utilizada no projeto de uma barragem, para determinar sua altura, obras de descarga, borda livre e armazenamento (FEMA, 2015).

A vazão de projeto de barragens pode ser estimada utilizando distribuições probabilísticas em séries temporais de valores máximos anuais (Isensee et al., 2021). Essa vazão pode ser determinada através da estimativa da probabilidade de ocorrência ou recorrência de eventos extremos (Santos et al., 2014), por meio da fixação de um tempo de retorno (TR) (Cassalho et al., 2017). A utilização do termo TR é ampla no Brasil (Cassalho et al., 2017; Lopes et al., 2017; Back, 2018; do Vale Moreira et al., 2020; Sabino et al., 2020). A vazão de projeto deve ser estimada visando obter uma baixa probabilidade de falha, na ordem de 1 para 1000 (CNRH, 2012; Felder et al., 2019).

A estimativa da probabilidade de ocorrência ou recorrência de eventos extremos possui diversas aplicações nas ciências ambientais, que vão desde o projeto de estruturas hidráulicas como bueiros, pontes e barragens (Morais et al., 2020) a determinação de equações IDF (Back e Cadorin, 2020), projetos de energia eólica (de Araújo e Marinho, 2019), mapeamento de áreas inundáveis (Larentis et al., 2020) e estudos sobre enchentes e secas (Amorim et al., 2020). Para realizar essa estimativa há diversas distribuições de

probabilidade disponíveis, não havendo um consenso sobre qual é mais adequada (Costa e Fernandes, 2015; Back e Cadorin, 2020). A escolha de uma determinada distribuição de probabilidades para estimar a vazão de projeto em um ambiente não estacionário e para baixas probabilidades, é ainda muito desafiadora (Wilcox et al., 2018). Deve-se considerar que, neste tipo de projeto, mais do que aspectos econômicos, há o risco de dano a vidas (Back et al., 2019).

Neste contexto, um aspecto preocupante é que mudanças climáticas e alterações no uso e ocupação da terra e da água, estão tornando os fenômenos extremos mais frequentes, alterando as estatísticas das séries temporais de dados fluviométricos no Brasil e no mundo (Do et al., 2017; Arnell e Chunzhen, 2018; Bartiko et al., 2019; Gudmundsson et al., 2019; Souza et al., 2020). Portanto, as séries temporais de vazões estão se tornando não estacionárias (Tan e Gan, 2015).

Usualmente, a estacionariedade em séries temporais de vazões máximas costuma ser avaliada através de testes de tendências monotônicas ou pontos de mudança (do Vale Moreira et al., 2016; de Oliveira et al., 2020). Estas séries não estacionárias, mesmo internacionalmente, não há uma metodologia definida para determinar a vazão de projeto (François et al., 2019). No Brasil, há poucos estudos com séries temporais de vazões máximas não estacionárias. Há uma preocupação crescente sobre este tema na comunidade nacional (Paiva et al., 2021). Os impactos gerados por eventos extremos podem ser graves, principalmente quando há redução em sua recorrência (Brunner et al., 2021).

Com base no que foi exposto, o objetivo deste estudo é estimar a vazão de projeto de uma série temporal não estacionária para baixa probabilidades (TR milenar), comparando seu valor com a vazão de projeto de um vertedouro de uma barragem existente.

A hipótese deste estudo é que as tendências crescentes em séries temporais de vazões máximas podem estar aumentando o risco hidrológico de ruptura das barragens brasileiras existentes.

Material e métodos

Este estudo foi aplicado na estação fluviométrica Abelardo Luz (73600000). A escolha por essa estação considerou os seguintes aspectos:

- Série temporal com qualidade de dados razoável (mais do que 60 anos e poucas falhas);
- Possui uma barragem a jusante.

Os dados desta estação fluviométrica foram coletados no portal HidroWeb, administrado pela Agência Nacional de Águas e Saneamento

Básico (SNIRH, 2020). A barragem analisada foi a PCH Ludesa, localizada no rio Chapecó entre os municípios de São Domingos, Ipuacu e Abelardo Luz, no Estado de Santa Catarina (Figura 1).

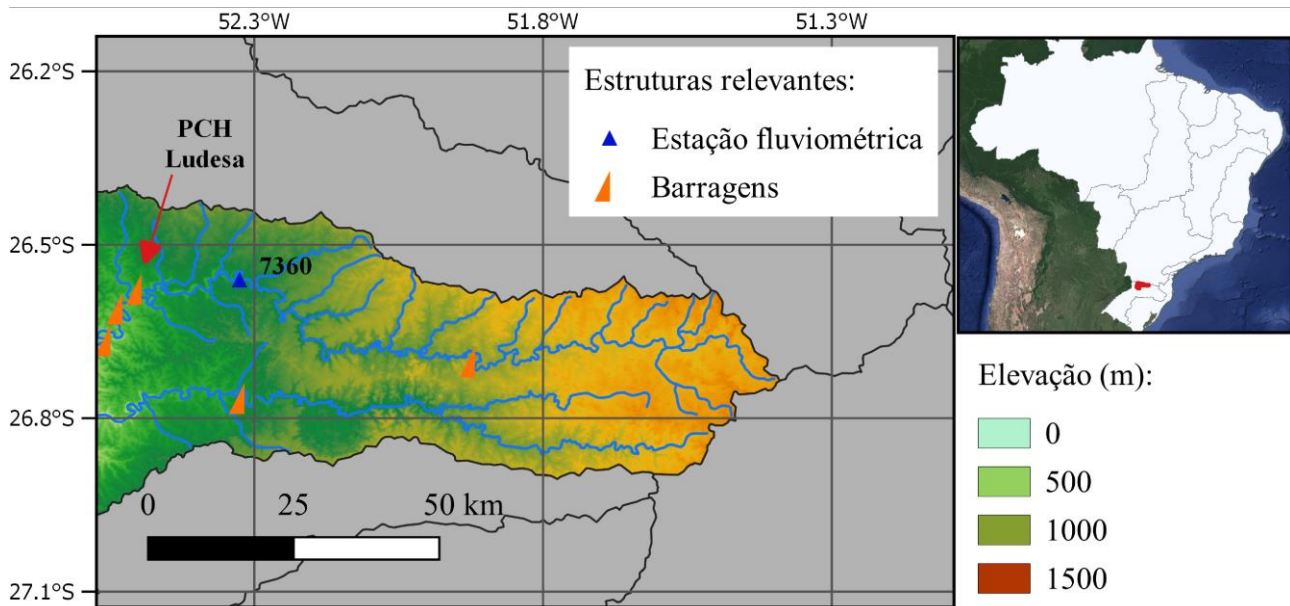


Figura 1. Características geográficas da área de estudo

A estação fluviométrica possui área de drenagem de 1840 km². A série temporal da estação utilizada possui 62 anos de dados, iniciando de 1957 e finalizando em 2019 (SNIRH, 2020). A série temporal original possuía 3% de falhas. Considerando que a determinação da vazão de projeto é um processo complexo, estando a significância do resultado interligada com a qualidade e quantidade dos dados observados (Amorim et al., 2016; Martins et al., 2020). As falhas foram preenchidas por correlação linear com dados de séries temporais de vazões a jusante e a montante. Em todos os casos, o coeficiente de determinação da correlação linear foi superior a 0,9, indicando boa correlação.

A área de contribuição da barragem é de 2378 km² (SNIRH, 2020). A barragem foi finalizada em 2004, possuindo um reservatório com capacidade de 141 hm³ (SNISB, 2019). O vertedouro foi dimensionado para uma vazão máxima milenar de 3550 m³/s (MPB Engenharia, 2008).

Em relação aos métodos aplicados neste trabalho. Iniciou-se com a obtenção da série temporal de máximos diários anuais. Para isso, selecionou-se o maior valor de vazão diária dentro da série temporal de máximos diários mensais. Como o mês de início da série temporal anual pode influenciar no resultado (Oliveira et al., 2018; Chan et al., 2020), optou-se por gerar 12 séries temporais de máximos diários anuais, em função do mês de início, visando abranger todos os possíveis anos

hidrológicos, visto que a região sul do Brasil as chuvas são bem distribuídas ao longo do ano. Avaliação da não estacionariedade das séries temporais

Para avaliar tendências monotônicas nas séries temporais, aplicou-se o teste Man-Kendall (MK). Este teste tem como hipótese nula a independência serial no tempo (Back, 2001). Trata-se de um teste não paramétrico (Amorim et al., 2020), conforme Equação 1 (Tan e Gan, 2015).

$$S = \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{j=k+1}^n \text{sign}(x_j - x_k) \quad (1)$$

onde n é o total de dados da série, x_j e x_k são os dados temporais em ordem cronológica.

A estatística Z do MK pode ser calculada pela Equação 2, onde o S positivo indica uma tendência positiva de série (dos Santos et al., 2016). Um dos problemas associados ao MK é que os resultados podem ser afetados pela presença de correlações.

$$Z(MK) = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{\text{Var}(S)}} & \text{se } S > 0 \\ 0 & \text{se } S = 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{\text{Var}(S)}} & \text{se } S < 0 \end{cases} \quad (2)$$

Também foi aplicado o teste de Pettitt (PETT), que é um teste não paramétrico, utilizado para detectar pontos de mudança em séries temporais (Martins et al., 2020). Este teste é baseado em uma versão da estatística Mann-

Whitney para testar se duas amostras são da mesma população (Villarini et al., 2009). O teste pode ser aplicado pelas equações Equação 3, Equação 4 e Equação 5 (dos Santos et al., 2016).

$$K_t = \max_{1 \leq t \leq T} |U_{t,T}| \quad (3)$$

$$U_{t,T} = \sum_{i=1}^t \sum_{j=t+1}^T \text{sign}(X_i - X_j) \quad (4)$$

$$\text{sign}(x) = \begin{cases} 1 & \text{se } S > 0 \\ 0 & \text{se } S = 0 \\ -1 & \text{se } S < 0 \end{cases} \quad (5)$$

onde K_T é o valor crítico; T é o número de anos da série histórica, sendo $t \ 1 \leq t \leq T$. A estatística K_T do teste é o máximo valor absoluto de $U_{t,T}$, e representa a amostra onde houve mudança brusca na série temporal, e o nível de significância do teste é obtido pela Equação 6 (dos Santos et al., 2016).

A hipótese nula deste teste é a ausência de um ponto de mudança na série temporal, podendo ser rejeitada, dependendo do grau de significância utilizado.

$$P \cong 2 \exp\left(\frac{-6K_T^2}{T^3 + T^2}\right) \quad (6)$$

Avaliação da persistência/autocorrelação

Como os testes de tendência exigem independência serial (Back, 2001), é necessário avaliar a persistência presente nas séries. Para isso, foi avaliado o coeficiente de autocorrelação das séries temporais, através da função da autocorrelação, variando o lag de 1 até 30. Além deste procedimento, foi avaliado o expoente de Hurst. Este expoente é indicativo da existência ou não da persistência de longo prazo (LTP) em uma série temporal de vazão (Kumar et al., 2009). Para estimar esse expoente, a expressão chamada intervalo reescalado (R/S) foi usada, conforme Equação 7, o cálculo inicia com a divisão de uma série temporal de comprimento L em d subséries (m) de comprimento n (Weron, 2002).

$$\left(\frac{R}{S}\right)_n = \frac{1}{d} \sum_{m=1}^d \frac{R_m}{S_m} \quad (7)$$

onde R_m é o alcance e S_m é o desvio padrão de subséries criadas, normalizadas e acumuladas (Weron, 2002).

O valor de H pode ser obtido executando a Equação 8, sendo c uma constante. Um H inferior ou igual a 0,5 significa que não há comportamento persistente na série temporal. A distância do ponto neutro (0,5) é indicativa da intensidade do processo (Weron & Przybyłowicz, 2000).

$$\log\left(\frac{R}{S}\right)_n = \log(c) + H \log(n) \quad (8)$$

Distribuições de probabilidades e estimação dos parâmetros

Neste estudo duas distribuições de probabilidades para valores extremos foram aplicadas: a distribuição *generalized extreme value* (GEV) e a distribuição de Gumbel ou distribuição de extremos tipo I. Essas duas distribuições costumam ser aplicadas em estudos hidrológicos (do Vale Moreira et al., 2016; Nashwan et al., 2019; Back e Cadorin, 2020), sendo as mais aplicadas em algumas áreas das ciências ambientais (Santos Neto e Sarmiento, 2020). A função densidade da distribuição GEV é representada pela Equação 9 e função de quantis pela Equação 10 (Naghetini e Pinto, 2007), onde cada letra representa um parâmetro, sendo: localização (μ), escala (α) e forma (ξ) (Coles et al., 2001). A distribuição de Gumbel é um caso particular da GEV, onde o parâmetro forma é considerado igual a zero (Naghetini e Pinto, 2007).

$$f_y(y) = \frac{1}{\alpha} \left[1 - \xi \left(\frac{y-\mu}{\alpha}\right)\right]^{\frac{1}{\xi}-1} \exp\left\{-\left[1 - \xi \left(\frac{y-\mu}{\alpha}\right)\right]^{\frac{1}{\xi}}\right\} \quad (9)$$

$$x(TR) = \mu + \frac{\alpha}{\xi} \left\{1 - \left[-\ln\left(1 - \frac{1}{TR}\right)\right]^{\xi}\right\} \quad (10)$$

Para estimar os parâmetros das distribuições, utiliza-se os chamados métodos de inferência estatística (Naghetini e Pinto, 2007). Na literatura há diversos métodos de inferência que são aplicados em dados hidrológicos, porém existem poucos quando se analisa apenas métodos aplicados em séries não estacionárias. Um destes métodos é o método de máxima verossimilhança (MLE) (Šraj et al., 2016).

O MLE produz estimadores de parâmetros associados a uma população através da maximização da função de verossimilhança (Coles et al., 2001), ou seja, avalia quais estimadores dos parâmetros têm a maior probabilidade de terem gerado a amostra. O MLE produz bons resultados, tendo como principal desvantagem a aplicação em amostras pequenas (de Paola et al., 2018). Como a série temporal analisada é superior a 60 anos e considerando que este método foi aplicado em diversos estudos com séries hidrológicas de extremos não estacionárias (Razmi et al., 2017; Hamdi et al., 2018; Nashwan et al., 2019), optou-se por utilizar este método neste estudo. O equacionamento do MLE pode ser observado nos estudos de (Coles et al., 2001; do Vale Moreira et al., 2016).

Para analisar o comportamento dos parâmetros das séries temporais, de modo a modelá-los adequadamente nos modelos não estacionários, utilizou-se a técnica da estimação prévia dos parâmetros através de janelas deslizantes, conforme (Wilcox et al., 2018; Kudryavtseva et al., 2020). Nessa técnica cada parâmetro é obtido através de intervalos estacionários de tempo da série, como 15 ou 30 anos. Neste trabalho a técnica de janela deslizante foi aplicada em intervalos de 30 anos. Visando avaliar os resultados das distribuições e modelos utilizados, foi aplicado o critério de informação de Akaike (AIC) (Šraj et al., 2016).

Testes de Aderência

Foram aplicados testes de aderência para avaliar a qualidade do ajuste das distribuições Gumbel e GEV, sendo eles o *probability plot correlation coefficient* (PPCC), o teste de Kolmogorov-Smirnov (K-S) e Anderson-Darling (A-D). Estes testes foram escolhidos por serem recomendados para dados hidrológicos extremos (Abreu et al., 2018; Back e Cadorin, 2020).

O PPCC é considerado um teste poderoso e conceitualmente simples (Yang et al., 2020). Ele avalia o coeficiente de correlação linear entre as observações e a distribuição teórica, realizando uma análise quantitativa do ajuste (Heo et al., 2008; Yang et al., 2020). As equações deste teste, suas formulações específicas para cada distribuição, bem como sua programação, podem ser observadas nos trabalhos de (Heo et al., 2008; Pohlert, 2020; Yang et al., 2020).

O teste K-S é baseado na comparação das funções de probabilidade acumuladas, entre os dados observados e a distribuição teórica. O seu valor é obtido pela máxima diferença absoluta entre essas funções (Abreu et al., 2018; Back e Cadorin, 2020). As equações deste teste, bem como sua programação, podem ser observadas nos trabalhos de (Kumar e Ligges, 2011; Back e Cadorin, 2020).

Segundo (Abreu et al., 2018) o teste K-S tem dificuldades para avaliar diferenças nas caudas das distribuições. Por isso optou-se por aplicar também o teste A-D. Este teste também realiza a comparação das funções de probabilidade acumuladas, entre os dados observados e a distribuição teórica, porém com enfoque nas caudas das distribuições (Back e Cadorin, 2020). As equações deste teste, bem como sua programação, podem ser observadas nos trabalhos de (Kumar e Ligges, 2011; Back e Cadorin, 2020).

Resultados e discussão

Inicia-se os resultados deste estudo com algumas estatísticas descritivas das séries temporais de máximos diários anuais para diversos anos hidrológicos (Tabela 1). Observa-se que há variações entre cada série temporal, mas todas apresentam um coeficiente de assimetria elevado e positivo, ou seja, valores extremos são mais prováveis.

Tabela 1. Estatísticas descritivas para cada ano hidrológico

Início da série	Fim da série	Média (m ³ /s)	Assimetria
Janeiro - 1958	Dezembro - 2019	497	3.34
Fevereiro - 1958	Janeiro - 2020	498	3.34
Março - 1958	Fevereiro - 2020	496	3.31
Abril - 1958	Março - 2020	500	3.34
Maio - 1958	Abril - 2020	506	3.42
Junho - 1958	Maio - 2020	527	3.09
Julho - 1957	Junho - 2019	534	3.07
Agosto - 1957	Julho - 2019	516	3.46
Setembro - 1957	Agosto - 2019	508	3.47
Outubro - 1957	Setembro - 2019	499	3.24
Novembro - 1957	Outubro - 2019	491	3.30
Dezembro - 1957	Novembro - 2019	494	3.30

Avaliação da não estacionariedade das séries temporais

As vazões da estação fluviométrica Abelardo Luz possuem tendências crescentes significativas detectadas pelo MK. Além disso possui um ponto de mudança significativo detectado pelo PETT. Pela Tabela 2, observa-se que a tendência crescente e os pontos de mudança estão presentes em todas as séries temporais de máximos diários anuais geradas, sendo maiores ao considerar o ano iniciando em setembro e menores iniciando em abril. O ano correspondendo ao ponto de mudança possui variações, mas com predomínio para o início da década de 70.

Tabela 2. Variação da tendência devido a seleção dos dados

Início da Série	Fim da Série	MK Estatística Z	p-valor	PETT Ponto de mudança	p-valor
janeiro-1958	dezembro-2019	2.369	0.018	1971	0.020
fevereiro-1958	janeiro-2020	2.466	0.014	1971	0.017
março-1958	fevereiro-2020	2.600	0.009	1971	0.011
abril-1958	março-2020	2.321	0.020	1971	0.018
maio-1958	abril-2020	2.588	0.010	1982	0.011
junho-1958	maio-2020	2.478	0.013	1982	0.005
julho-1957	junho-2019	2.430	0.015	1970	0.014
agosto-1957	julho-2019	2.819	0.005	1972	0.017
setembro-1957	agosto-2019	3.074	0.002	1970	0.006
outubro-1957	setembro-2019	2.806	0.005	1970	0.014
novembro-1957	outubro-2019	2.497	0.013	1970	0.017
dezembro-1957	novembro-2019	2.478	0.013	1970	0.011

Com base nestes resultados, pode-se caracterizar as séries temporais geradas por essa estação fluviométrica como não estacionárias. Observa-se também que o ano hidrológico que apresentou a maior tendência foi o setembro-agosto, justamente o ano que apresentou maior assimetria.

Estudos em outras bacias hidrográficas, como no rio Paraopeba (MG), e na bacia Lagoa Mirim (RS), detectaram que o ano hidrológico pode ser definido de: outubro a setembro (Fraga e Ribas, 2020) e maio a abril (Chagas Neta et al., 2019), respectivamente. Alguns estudos na mesma bacia hidrográfica determinaram que o ano hidrológico que gerava a maior ocorrência de chuvas máximas anuais é o ano julho-junho (Back et al., 2019). Isso indica que precipitação e vazão podem não ter uma correspondência exata. Portanto, a seleção do ano hidrológico para estimativa de máximos deve ser selecionada com cuidado.

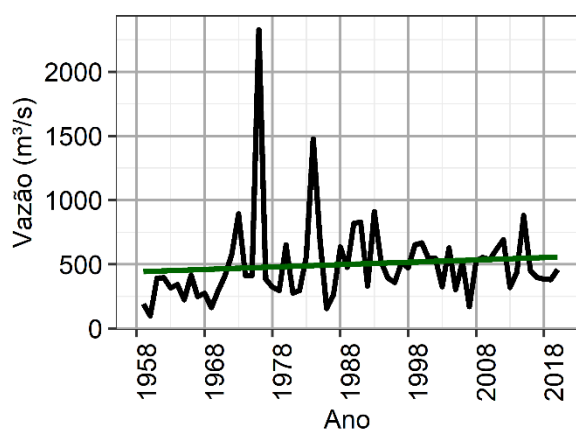


Figura 2. Série temporal de máximos diários anuais MDA4

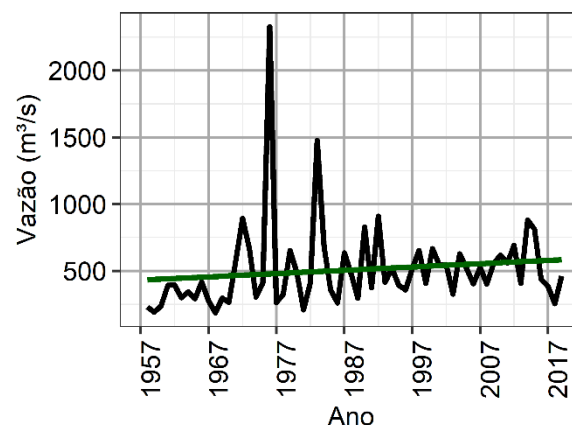


Figura 3. Série temporal de máximos diários anuais MDA9

Para não tornar as análises repetitivas, optou-se por utilizar apenas duas séries temporais de máximos diários anuais (MDA). Uma correspondente ao início em abril (MDA4) e outra em setembro (MDA9), visando abranger os dois extremos das tendências. As séries MDA4 e MDA9 são apresentadas nas Figuras 2 e 3, respectivamente.

Avaliação da persistência/autocorrelação

A próxima análise diz respeito a verificação da presença de persistência nas séries temporais selecionadas. Pelos gráficos da autocorrelação das MDA4 e MDA9 (Figuras 4 e 5), percebe-se que há apenas uma possível autocorrelação significativa no lag 7 da MDA9, indicando persistência fraca.

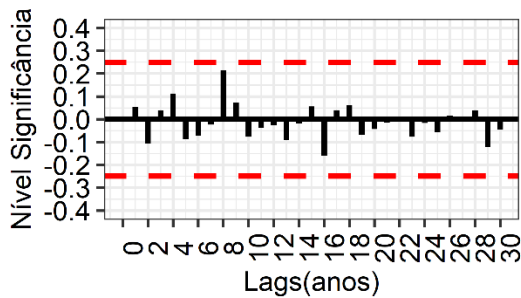
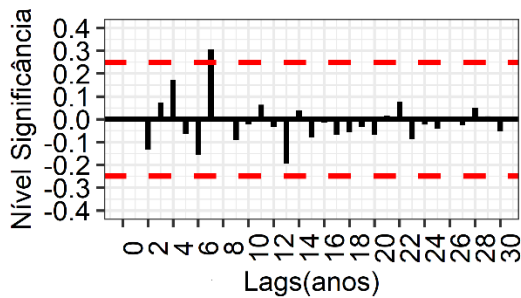


Figura 4. Correlograma da série temporal MDA4



O expoente de Hurst, das séries temporais MDA4 e MDA9 apresentou os valores de H de 0.55 e 0.56, respectivamente. Embora o valor neutro deste expoente seja 0,5 (Weron e Przybyłowicz, 2000), valores mais comuns são acima de 0.55 (Koscielny-Bunde et al., 2006). Freitas (2020), por exemplo, obteve valores que variam de 0,6 até 0,98 na bacia hidrográfica da Cantareira (SP). Portanto esses valores indicam apenas fraca persistência de longo prazo. Analisando o conjunto dos dados, pode-se concluir que a persistência de curto ou longo prazo está pouco presente nestas séries temporais, podendo considerar os seus dados como relativamente independentes.

Testes de aderência

Antes de realizar as análises das distribuições, optou-se por realizar os testes de aderência visando avaliar a aplicabilidade das distribuições propostas as séries temporais geradas. Os resultados são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3. P-valores dos testes de aderência

Série Temporal	Testes	Gumbel	GEV
MDA4	PPCC-Filliben	0.0018	2.2×10^{-15}
	K-S	0.8257	0.9636
	Anderson-Darling	0.1640	0.4491
MDA9	PPCC-Filliben	0.0011	2.2×10^{-15}
	K-S	0.8704	0.9311
	Anderson-Darling	0.1324	0.7397

Os p-valores representam a probabilidade de rejeitar ou aceitar a hipótese nula, sendo, neste caso, a hipótese nula a aderência entre as séries

temporais. Portanto, p-valores menores do que 0.05 são indícios de que o teste resultou em séries temporais significativamente não aderentes. Pelo teste PPCC-Filliben, nenhuma das distribuições se adequa as séries temporais originais. No entanto, pelos testes K-S e A-D, as distribuições podem ser consideradas aderentes. O teste A-D pode ser considerado o mais severo dos três (de Alcântara et al., 2019), sendo recomendado para caudas pesadas. Entende-se que ambas as distribuições podem ser consideradas aderentes, especialmente a distribuição GEV, que apresentou p-valores mais próximos de 1. Com base no valor de assimetria e da própria plotagem da série temporal, seria possível supor que a GEV apresenta valores mais consistentes, por demandar um parâmetro forma diferente de zero.

Distribuições de probabilidades e estimação dos parâmetros

Antes de aplicar as distribuições, especialmente as considerações não estacionárias, aplicou-se a técnica das janelas deslizantes visando identificar o comportamento de cada parâmetro ao longo do tempo. Optou-se por exibir apenas o comportamento da MDA9 nas próximas análises, pois o comportamento de ambas as séries temporais é semelhante, interessando apenas as análises finais.

Percebe-se que o parâmetro localização apresenta uma variação crescente (Figura 6), visualmente linear, indicando aumento nas médias das vazões ao longo do tempo. Na Figura 7 demonstra o parâmetro escala, indicando uma elevação na dispersão dos dados, relacionado a variância. Essa dispersão é maior nas janelas que incorporam os anos de 1975 e 1983, onde houve expressivas variações nos valores observados. Mas, com exceção destes anos, percebe-se pouca variação neste parâmetro, indicando que visualmente este pode ser modelado como constante. Por fim, a variação do parâmetro forma, ilustrado pela Figura 8, apresenta variação similar ao parâmetro escala, sendo também bastante afetado pelos dados de 1975 e 1983.

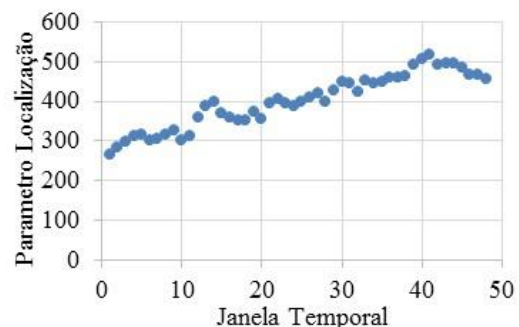


Figura 6. Janelas deslizantes do parâmetro localização

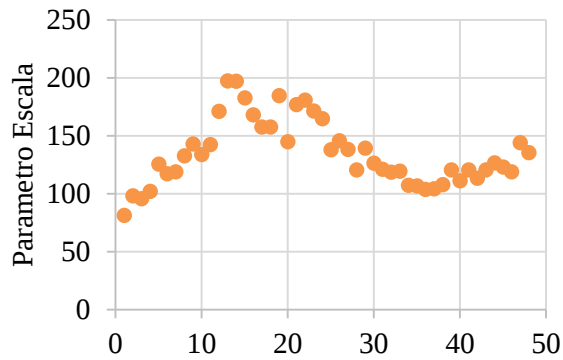


Figura 7. Janelas deslizantes do parâmetro escala

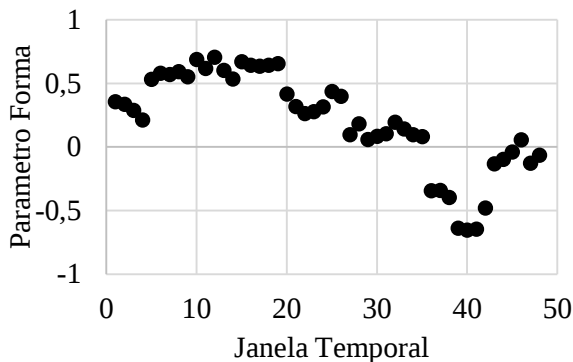


Figura 8. Janelas deslizantes do parâmetro forma

Concluído as análises das janelas, quatro modelos podem ser propostos para realizar as análises não estacionárias. Conforme Tabela 4, propõe-se um modelo Gumbel estacionário, chamado M1; um modelo GEV estacionário,

chamado M2; dois modelos GEV não estacionários, nos quais foi aplicado uma função linear apenas no parâmetro localização (M3) e outro aplicado uma função linear em ambos os parâmetros, localização e escala (M4).

Tabela 4. Modelos distributivos propostos

Modelo	Distribuição	μ	α	ξ
M1	Gumbel	Const.	Const.	-
M2	GEV	Const.	Const.	Const.
M3	GEV	Linear	Const.	Const.
M4	GEV	Linear	Linear	Const.

Com base nos modelos propostos, utilizando o MLE para inferir os parâmetros e o critério AIC para avaliar o ajuste, obtém-se a estimativa dos parâmetros com um intervalo de confiança de 95% (Tabela 5).

Observa-se na Tabela 5 que, pela avaliação do critério AIC, os modelos não lineares apresentaram melhor ajuste as séries temporais. O modelo M4 apresentou o melhor ajuste. Comportamento similar foi obtido por Chan et al. (2020) em outras estações fluviométricas brasileiras. O parâmetro forma ficou bastante elevado em todos os modelos, reforçando o comportamento de cauda pesada, possuindo a maior dispersão de dados no modelo M4.

Tabela 5. Estimativa e avaliação dos parâmetros de cada modelo proposto

Modelos	Estimativa dos parâmetros com intervalo de confiança de 95%					AIC
	μ_0	μ_1	α_0	α_1	ξ	
M1	393.6 [348.4 - 438.8]	-	174.4 [138.6 - 210.3]	-	-	849
M2	369.3 [326.7 - 411.8]	-	149.5 [114.7 - 184.3]	-	0.259 [0.043 - 0.474]	841
M3	299.9 [245.9 - 353.9]	2.51 [1.05 - 3.96]	136.7 [105.4 - 168.0]	-	0.256 [0.060 - 0.452]	832
M4	253.4 [194.9 - 311.8]	3.97 [1.98 - 5.96]	4.471 [3.983 - 4.958]	0.01 [0.00 - 0.02]	0.308 [0.102 - 0.513]	830

Vazão de projeto na estação Abelardo Luz

Com os modelos definidos e os parâmetros estimados, pode-se estimar a vazão de projeto do trecho abrangido pela estação fluviométrica 7360, relativo a série temporal MDA9. Optou-se por exibir vazões de projeto para alguns TR's mais utilizados em projetos (Tabela 6). Observa-se que o modelo M1 (Gumbel) apresenta valores sempre inferiores aos demais. A vazão máxima diária anual registrada nesta série temporal foi 2328 m³/s em

1975 e 1474 m³/s em 1983. Portanto, percebe-se que o modelo M1 gera insegurança, não sendo adequado para aplicar nesta série temporal. Em função dos resultados anteriores (assimetria positiva, teste A-D e parâmetro forma positivo), já era esperado que os modelos com a distribuição GEV apresentassem valores mais coerentes do que o modelo Gumbel. A distribuição GEV é mais indicada para causa pesadas (de Alcântara et al., 2019).

Tabela 6. Estimativa das vazões por TR e por modelo da série temporal MDA9

Modelos	Estimativa Vazão de projeto média (m³/s) para cada TR			
	100 anos	500 anos	1000 anos	10000 anos
M1	1196	1477	1598	2000
M2	1690	2674	3240	6046
M3	1654	2540	3049	5559
M4	2414	4039	5027	10325

Em relação aos demais modelos, observa-se que o modelo estacionário (M2) é mais conservador do que o modelo não estacionário (M3). Porém este comportamento não deve ser interpretado como algo típico. Em outros estudos, como Zhang et al. (2019) aplicado no rio Yangtze (China) e no estudo de Loyeh e Bavani (2021) aplicado no rio Ghareh Sou (Irã), os modelos estacionários aplicados resultaram em valores de inundações inferiores ao de modelos não estacionários. O que se observou é que essa análise varia principalmente em função do TR analisado, pois nos estudos citados o TR utilizado foi na ordem de 100 anos.

Fazendo uma análise qualitativa sobre os modelos, embora não seja possível afirmar qual o modelo mais adequado, pelo critério da informação AIC, o modelo M4 possui melhor ajuste. Porém o modelo M4 é o mais conservador de todos, chegando a apresentar o dobro da vazão no TR de 10000 anos. Esse comportamento reflete diretamente os valores do parâmetro forma obtidos na Tabela 5.

Conforme François et al. (2019), para estimativas que superem 3 vezes o tamanho da série temporal os resultados devem ser analisados com cautela. Embora modelos não estacionários podem apresentar melhores ajustes, eles também podem produzir maiores incertezas (Serinaldi e Kilsby, 2015). O modelo M4, apesar de apresentar o melhor ajuste pelo AIC, foi o que resultou também a maior amplitude, caracterizando assim uma maior incerteza. Porém, considerando os valores das vazões máximas registradas nos anos de 1975 e 1983, pode-se presumir que este é o mais adequado para esta série temporal, pelo menos para TR's até 150 anos. Ressalta-se que, para elevados TR's, outros estudos complementares devem ser realizados para comprovar os resultados estatísticos, como modelos que utilizem covariáveis físicas (Šraj e Bezak, 2020), ou modelos que utilizem a máxima vazão provável (Felder et al., 2019; François et al., 2019).

Vazão de Projeto do vertedouro da PCH Ludesha

Para estimar a vazão de projeto no vertedouro da PCH Ludesha e comparar com a vazão dimensionada no projeto, foi necessário

ajustar em função das áreas de drenagem. Este procedimento foi feito através do ajuste linear entre as áreas de drenagem da barragem e da estação fluviométrica 7360. A proporção entre elas é de 1.29.

Para comparar a vazão de projeto existente do vertedouro com a vazão teórica estimada, utilizou-se as séries temporais MDA4 e MDA9. Além disso, em função dos resultados anteriores, optou-se por incluir algumas modificações da série temporal MDA9. Uma sem os valores de 1975, simulando uma situação em que aquele pico de 2300 m³/s ainda não ocorreu, nomeada MDA9-Sem-75 e outra simulando uma série temporal mais curta, com 40 anos de dados, nomeada MDA9-40. Os resultados, para os quatro modelos propostos podem ser observados na Tabela 7.

Tabela 7. Estimativa das vazões de projeto da PCH Ludesha para o TR de 1000 anos

Modelos	Estimativa da Vazão de projeto média (m³/s) para cada série temporal			
	MDA4	MDA9	MDA9-Sem-75	MDA9-40
M1	2163	2061	1858	1954
M2	3239	4180	2586	2388
M3	3402	3933	2562	2521
M4	3572	6487	3878	1998

Observa-se que, as séries temporais MDA4 e MDA9 apresentam divergência de resultados, lembrando que são séries temporais oriundas dos mesmos dados, apenas variando o mês inicial de coleta. Observa-se também que as séries temporais que refletem dados incompletos (MDA9-Sem-75) ou curtos (MDA9-40), minimizam muito a vazão de projeto para um TR de 1000 anos. Por exemplo, se a cheia de 1975 não tivesse ocorrido, pelos dados da série temporal MDA9-Sem-75 no modelo M4, ela seria prevista apenas em um TR de aproximadamente 500 anos, porém ocorreu em uma série temporal de 62 anos.

Avaliando os dados em conjunto com a vazão de projeto real do vertedouro, que é de 3550 m³/s, nota-se que na série temporal MDA9, os

modelos M2, M3 e M4, pode-se afirmar que a AEP atual deste vertedouro, considerando o modelo M4, é de 0.67% em cada ano, sendo que a AEP deveria ser de 0.1% em cada ano, indicando que há uma elevação no risco hidrológico deste vertedouro.

Em função dos resultados obtidos, frisa-se que outros fatores de segurança não foram considerados nesta estimativa, como majorações e borda livre. Portanto a probabilidade de excedência anual pode ser ainda maior. Outro ponto não considerado foi a vida útil do projeto, informação que pode melhorar as estimativas de confiabilidade da estrutura (Hu et al., 2018).

Conclusões

(1) Pode-se concluir que o objetivo deste trabalho foi atingido, pois estimou-se a vazão de projeto da PCH Ludesa, sendo essa vazão proveniente de uma série temporal não estacionária.

(2) Em relação a comparação da vazão de projeto estimada com a vazão de projeto real do vertedouro, percebe-se que, a depender do modelo considerado, há uma redução no fator de segurança deste vertedouro.

(3) Percebeu-se também que, a confiabilidade da estimação da vazão de projeto está relacionada com a qualidade dos dados obtidos. Portanto, ao utilizar construir a série temporal ignorando o ano hidrológico; utilizando séries temporais curtas ou ainda com dados faltantes, pode resultar em erros na estimativa da vazão de projeto e consequentemente no dimensionamento do vertedouro.

Agradecimentos

Esta pesquisa foi apoiada pelo Programa UNIEDU / FUMDES Pós-Graduação (1423/SED/2019). Agradecemos à FAPESC (bolsa 2016TR2525) pelo apoio financeiro e ao CNPq (processo 304475/2020-3) pela bolsa de produtividade. Agradecemos à Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA) pelo fornecimento dos dados para a pesquisa.

Referências

Abreu, M.C., Cecílio, R.A., Pruski, F.F., Santos, G.R.D., Almeida, L.T.D., Zanetti, S.S., 2018. Critérios para Escolha de Distribuições de Probabilidades em Estudos de Eventos Extremos de Precipitação. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 33(4), 601–613.

Amorim, R.M., Albarici, F.L., del Pino, M.A.I.T., 2016. Mapa Digital do Escoamento Superficial por meio de Imagens de Sensor Remoto na sub-

bacia do Rio Moji Guaçu-MG. *Revista Brasileira de Geografia Física*, 9(3), 881-896.

Arnell, N., Chunzhen, L., 2018. *Hydrology and Water Resources*. IPCC, 193-227. Disponível: <https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/wg2TARchap4.pdf>. Acesso: 22 fev. 2021.

Back, A.J., 2001. Aplicação de análise estatística para identificação de tendências climáticas. *Pesquisa agropecuária brasileira*. 36(5), 717-726.

Back, A.J., 2018. Análise de frequência de vazões máximas para projetos de drenagem. *Revista Técnico-Científica de Engenharia Civil Unesc*, 1(2), 1–14.

Back, A.J., Wildner, L.D.P., Garcez, J.G., 2019. Análise de chuvas intensas visando ao dimensionamento de estruturas de conservação do solo para a região de Chapecó, Santa Catarina. *Agropecuária Catarinense*, 32(3), 95–100.

Back, A.J., Cadorin, S.B., 2020. Chuvas extremas e equações intensidade-duração-frequência para o estado do Acre. *Revista Brasileira de Ciências Ambientais (Online)*, 55(2), 159–170. Disponível: <https://doi.org/10.5327/Z2176-947820200597>. Acesso: 22 fev. 2021.

Bartiko, D., Oliveira, D.Y., Bonumá, N.B., Chaffe, P.L.B., 2019. Spatial and seasonal patterns of flood change across Brazil. *Hydrological Sciences Journal*, 64(9), 1071–1079.

Brasil, 2020. Lei nº 14.066. *Diário Oficial da União*, Brasília, DF. Disponível: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2019-2022/2020/lei/L14066.htm. Acesso: 22 fev. 2021.

Brunner, M.I., Slater, L., Tallaksen, L.M., Clark, M., 2021. Challenges in modeling and predicting floods and droughts: A review. *Advanced Review*, 8,1-32.

Cassalho, F., Beskow, S., Vargas, M.M., Moura, M.M.D., Ávila, L.F., Mello, C.R.D., 2017. Hydrological regionalization of maximum stream flows using an approach based on L-moments. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, 22, e27.

Chagas Neta, M.C., 2019. Ajuste da distribuição log-pearson III às vazões máximas diárias anuais da bacia hidrográfica da lagoa Mirim/RS. *Brazilian Journal of Development*, 5(6),6001-6007.

Chan, P.D., Costa, F.D.S., Damázio, J.M., Rotunno Filho, O.C., 2020. Stationarity of extreme streamflow time series for flood control operation in hydropower reservoirs. *Cadernos do IME - Série Estatística*, 46, 16-29.

CNRH. Conselho Nacional de Recursos Hídricos, 2012. Resolução nº 143, de 10 de julho de 2012.

- Brasília, DF: Disponível: <https://cnrh.mdr.gov.br/resolucoes/1922-resolucao-n-143-de-10-de-julho-de-2012/file>. Acesso: 22 fev. 2021.
- Coles, S., Bawa, J., Trenner, L., Dorazio, P., 2001. An introduction to statistical modeling of extreme values. Springer Berlin Heidelberg.
- Costa, K., Fernandes, W., 2015. Avaliação do tipo de distribuição de probabilidades das vazões máximas diárias anuais no Brasil. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, 20(2), 442-451.
- Dalcin, A.P., Marques, G.F., 2019. Simulação da qualidade da água para suporte em modelos de otimização para planejamento e gestão de recursos hídricos. *Rev. Gest. Água Am. Lat.*, 16(15), 1-15.
- de Alcântara, L.R.P., Coutinho, A.P., Dos Santos Neto, S.M., Melo, T.D.A.T.D.; Costa, L.F., Ribas, L.V.D.S., Antonino, A.C.D., Alves, E.M., 2019. Modelos probabilísticos para eventos de precipitações extremas na Cidade de Palmares - PE. *Revista Brasileira de Geografia Física*, 12(4), 1355-1369.
- de Araújo, P.H.M., Marinho, M.H.D.N., 2019. Weibull parameters estimation methods for analysis of hydro-wind complementarity in northeast Brazil. *IEEE Latin America Transactions*, 17(4), 556-563.
- de Freitas, G.N., 2020. São Paulo drought: trends in streamflow and their relationship to climate and human-induced change in Cantareira watershed, Southeast Brazil. *Hydrology Research*, 51(4), 750-767.
- de Oliveira, M.M.F., de Oliveira, J.L.F., Fernandes, P.J.F., Ebecken, F. F., 2020. Análise de tendências anuais e sazonais de extremos da Temperatura da Superfície do Mar próximo à costa da América do Sul no período de 1979 a 2018. *Revista Brasileira de Geografia Física*, 13(06), 2531-2552.
- de Paiva, C. D., et al., 2021. Advances and challenges in the water sciences in Brazil: a community synthesis of the XXIII Brazilian Water Resources Symposium. *RBRH*, 25(50), 1-28.
- de Souza, A.S., Amorim, R.S., Reis, D.S., 2020. Influência da correlação temporal e da multiplicidade de testes na detecção de tendências de índices de chuva no território brasileiro. *Revista Brasileira de Climatologia*, 26, 107-129.
- de Paola, F., Giugni, M., Pugliese, F., Annis, A., Nardi, F., 2018. GEV Parameter Estimation and Stationary vs. Non-Stationary Analysis of Extreme Rainfall in African Test Cities. *Hydrology*, 5(2), 1-23.
- Do, H.X., Westra, S., Leonard, M., 2017. A global-scale investigation of trends in annual maximum streamflow. *Journal of Hydrology*, 552, 28-43.
- do Vale Moreira, J.G., Naghettini, M., Eleutério, J., 2016. Frequência e risco sob não-estacionariedade em registros pluviométricos da bacia do alto rio Tarauacá, Acre. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, 21(1), 232-241.
- do Vale Moreira, J.G., Muniz, M.A., Maia, G.F.N., Mesquita, A.A., Pereira, L.B., Serrano, R.O.P., 2020. Análise De Frequência De Vazões Máximas Registradas Na Bacia Hidrográfica do Alto Rio Juruá, Acre, Brasil. *SAJEBTT*, 7(2), 23-36.
- dos Santos, C.A., De Lima, A.M.M., Farias, M.H.C.S., Aires, U.R.V., De Oliveira Serrão, E.A., 2016. Análise estatística da não estacionariedade de séries temporais de vazão máxima anual diária na bacia hidrográfica do rio pardo. *HOLOS*, 32(7), 179-193.
- Felder, G., Paquet, E., Penot, D., Zischg, A., Weingartner, R., 2019. Consistency of Extreme Flood Estimation Approaches. *Journal of Hydrologic Engineering*, 24(7), 04019018.
- FEMA. Federal Guidelines for Dam Safety, 2015. Selecting and Accommodating Inflow Design Floods for Dams. Hyattsville. Disponível: <https://www.ferc.gov/sites/default/files/2020-04/chap2.pdf>. Acesso: 22 fev. 2021.
- Fraga, M.d.S., Ribas, L.P.R., 2020. Análise do comportamento das vazões nas bacias dos rios paraopeba e velhas. *Revista Mineira de Recursos Hídricos*, 1(2), 1-19.
- François, B., Schlef, K.E., Wi, S., Brown, C.M., 2019. Design considerations for riverine floods in a changing climate – A review. *Journal of Hydrology*, 574, 557-573.
- Franzle, C.L.E., Czupryna, M., 2020. Probabilistic assessment and projections of US weather and climate risks and economic damages. *Climatic Change*, v. 158, n. 3-4, p. 503-515.
- Gudmundsson, L., Leonard, M., Do, H.X., Westra, S., Seneviratne, S.I., 2019. Observed trends in global indicators of mean and extreme streamflow. *Geophysical Research Letters*, 46(2), 756-766.
- Hamdi, Y., Duluc, C., Rebour, V., 2018. Temperature Extremes: Estimation of Non-Stationary Return Levels and Associated Uncertainties. *Atmosphere*, 9(4), 1-20.
- Heo, J., Kho, Y.W., Shin, H., Kim, S., Kim, T., 2008. Regression equations of probability plot correlation coefficient test statistics from

- several probability distributions. *Journal of Hydrology*, 355(1–4), 1–15.
- Hu, Y., Liang, Z., Singh, V.P., Zhang, X., Wang, J., Li, B., Wang, H., 2018. Concept of Equivalent Reliability for Estimating the Design Flood under Non-stationary Conditions. *Water Resour Manage*, 32, 997-1011.
- ICOLD. International Commission on Large Dams, 2019. Dams' safety is at the very origin of the foundation of ICOLD. Paris. Disponível em: https://www.icold-cigb.org/GB/dams/dams_safety.asp. Acesso: 22 fev. 2021.
- Isensee, L.J., Pinheiro, A. & Detzel, D.H.M., 2021. Dam Hydrological Risk and the Design Flood Under Non-stationary Conditions. *Water Resour Manage* 35, 1499–1512.
- Koscielny-Bunde, E., Kantelhardt, J.W., Braun, P., Bunde, A., Havlin, S., 2006. Long-term persistence and multifractality of river runoff records: Detrended fluctuation studies. *Journal of Hydrology*, 322(1-4), 120-137.
- Kudryavtseva, N., Soomere, T., Mannikus, R., 2020. Non-stationary analysis of water level extremes in Latvian waters, Baltic sea, during 1961–2018. *Natural Hazards and Earth System Sciences Discussions*, 1–23.
- Kumar, V., Ligges, U., 2011. Package “reliaR”. 2011. Cran.R-project. Disponível: <https://cran.rproject.org/web/packages/reliaR/index.html>. Acesso: 18 fev. 2021
- Kumar, S., Merwade, V., Kam, J., Thurner, K., 2009. Streamflow trends in Indiana: Effects of long term persistence, precipitation and subsurface drains. *Journal of Hydrology*. 374(1-2), 171–183.
- Larentis, D.G., Nogare, M., Tucci, C.E.M., Pohlmann, P., 2020. Procedimentos e critérios para zoneamento de planícies de inundação em áreas urbanas. *Rev. Gest. Água Am. Lat*, 17(13), 1-21.
- Lira, F.A., Cardoso, A.O., 2018. Estudo de tendência de vazões de rios das principais bacias hidrográficas brasileiras. *Revista Brasileira de Ciências Ambientais*, 48, 21–37.
- Lopes, L.G., Rodriguez, D.A., Siqueira Junior, J.L., Mohor, G.S., 2017. Projeções de Descargas Extremas Sob Impactos das Mudanças Climáticas Na Região Amazônica. *Revista Brasileira de Cartografia*, 69(1), 209-227.
- Loyeh, N.S., Bavani, A.M., 2021. Daily maximum runoff frequency analysis under non-stationary conditions due to climate change in the future period: Case study Ghareh Sou basin. *Journal of Water and Climate Change*, jwc2021074.
- Martins, A.M., Filgueira, H.J.A., Azevedo Filho, A.C.D.; Silva, T.C.D.; Silva Júnior, M.H.D., 2020. Análise de não Homogeneidades de Séries de Vazão de Captações de Nascentes na Bacia Hidrográfica do Rio Gramame, PB, Brasil. *Revista Brasileira de Geografia Física*, 13(6), 2896-2907.
- Menescal, R.D.A., 2005. A segurança de Barragens e a Gestão de Recursos Hídricos no Brasil. Ministério do Planejamento. Brasília, DF. Disponível: <https://bibliotecadigital.seplan.planejamento.gov.br/handle/identem/202>. Acesso: 22 fev. 2021.
- Morais, M.A.V., Viola, M.R., Mello, C.R.D., Rodrigues, J.A.M., Oliveira, V.A.D., 2020. Regionalization of reference streamflows for the Araguaia River basin in Brazil. *Semina: Ciências Agrárias*, 41(3), 829-846.
- MPB ENGENHARIA, 2008. Gerenciamento e Supervisão Ambiental visando à Implantação e Operação da PCH Ludesha. 2008. Disponível: http://mpb.eng.br/projetos/ativ_setor_eletrico_ludesha.php. Acesso: 18 fev. 2021
- Naguettini, M., Pinto, E.J.A., 2007. *Hidrologia Estatística*. Belo Horizonte: CPRM.
- Nashwan, M.S., Ismail, T., Ahmed, K., 2019. Non-stationary analysis of extreme rainfall in peninsular Malaysia. *J. Sustain. Sci. Manag.*, 14, 17-34.
- Oliveira, D.Y., Bartiko, D., Chaffe, P.L.B., 2018. Incerteza Na Análise De Frequência De Vazões Máximas Anuais Utilizando Modelos Estacionário E Não Estacionário Aplicados À Região Sul Do Brasil. In: ENCONTRO NACIONAL DE DESASTRES 2018, Porto Alegre. Anais [...]. Porto Alegre: ABRH, 1–8.
- Pohlert, T., 2020. Package “ppcc”. Cran.R-project. Disponível: <https://cran.rproject.org/web/packages/ppcc/index.html>. Acesso: 22 fev. 2021.
- Razmi, A., Golian, S., Zahmatkesh, Z., 2017. Non-stationary frequency analysis of extreme water level: application of annual maximum series and peak-over threshold approaches. *Water resources management*, 31(7), 2065-2083.
- Sabino, M., Souza, A.P.D; Uliana, E.M., Lisboa, L., Almeida, F.T.D; Zolin, C.A., 2020. Intensity-duration-frequency of maximum rainfall in Mato Grosso State. *Revista Ambiente & Água*, 15(1), 1-12.
- Santos, W.D.O., Feitosa, A.P., Vale, H.S.M., Costa, D.D.O., Brito, R.F.D., Queiroz, R.F., Espínola Sobrinho, J., Lemos Filho, L.C.D.A., 2014. Chuvas Intensas para a Microrregião de Pau dos Ferros-R. *Revista Brasileira de Geografia Física*, 07(06), 1093-1099.

- Santos Neto, E.D.P., Sarmiento, A.P., 2020. Curvas de intensidade-duração-frequência: Um mapeamento sistemático. *Revista Brasileira de Engenharia e Sustentabilidade*, 8(1), 45-53.
- Serinaldi, F., Kilsby, C.G., 2015. Stationarity is undead: Uncertainty dominates the distribution of extremes. *Advances in Water Resources*, 77, 17–36.
- SNIRH. Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos, 2020. HidroWeb. Brasília: ANA. Disponível: <http://www.snirh.gov.br>. Acesso: 22 fev. 2021
- SNISB. Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens, 2019. Relatório de segurança de barragens 2019. Brasília, DF. Disponível:<http://www.snisb.gov.br/portal/snisb/relatorio-anual-de-seguranca-de-barragem/2019>. Acesso: 22 fev. 2021
- Šraj, M., Viglione, A., Parajka, J., Blöschl, G., 2016. The influence of non-stationarity in extreme hydrological events on flood frequency estimation. *Journal of Hydrology and Hydromechanics*, 64(4), 426–437.
- Šraj, M., Bezak, N., 2020. Comparison of time trend- and precipitation-informed models for assessing design discharges in variable climate. *Journal of Hydrology*, 589, 125374.
- Tan, X., Gan, T. Y., 2015. Nonstationary analysis of annual maximum streamflow of Canada. *Journal of Climate*, 28(5), 1788–1805.
- Villarini, G., Serinaldi, F., Smith, J. A., Krajewski, W. F., 2009. On the stationarity of annual flood peaks in the continental united states during the 20th century. *Water Resources Research*. 45(8), 1-17.
- Weron, R., Przybyłowicz, B., 2000. Hurst analysis of electricity price dynamics. *Physica A*, 283(3-4), 462–468.
- Weron, R., 2002. Estimating long-range dependence: finite sample properties and confidence intervals. *Physica A*, 312, 285–299.
- Wilcox, C., Vissel, T., Panthou, G., Bodian, A., Blanchet, J., Descroix, L., Quantin, G. Cassé, C., Tanimoun, B., Kone, S., 2018. Trends in hydrological extremes in the Senegal and Niger Rivers. *Journal of Hydrology*, 566, 531–545.
- Yang, Q., Gao, C., Wang, J., Ren, K., Yang, N., 2020. Probability distribution of gaps between tenon and mortise of traditional timber structures. *European Journal of Wood and Wood Products*, 78(1), 27–39.
- Zhang, X., Duan, K. Dong, Q., 2019. Comparison of nonstationary models in analyzing bivariate flood frequency at the Three Gorges Dam. *Journal of Hydrology*, 579, 124208.