

## XXIII SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS

### INCERTEZA NA DETERMINAÇÃO DAS CURVAS IDF NA BACIA DO ITAJAÍ

*Gabriel Anzolin<sup>1</sup>; Debora Yumi de Oliveira<sup>2</sup> & Pedro Luiz Borges Chaffe<sup>3</sup>*

**RESUMO** – A identificação de tendências em eventos extremos de precipitação levou ao desenvolvimento de metodologias capazes de determinar as Curvas de Intensidade-Duração-Frequência (IDF) considerando os eventos de não estacionariedade. O objetivo deste trabalho foi quantificar as incertezas acerca da determinação das Curvas IDF utilizando modelos estacionário e não estacionário, aplicados para séries históricas de precipitação da Bacia do Itajaí. A Inferência Bayesiana foi utilizada para aproximação da distribuição dos valores dos parâmetros e na quantificação das incertezas dos modelos. Como resultados, tem-se que o modelo estacionário subestima as intensidades de precipitação para todas as durações e períodos de retorno investigados. Entretanto, quando se leva em consideração as incertezas, vemos que a diferença entre os modelos estacionário e não estacionário é clara apenas para pequenos períodos de retorno (5-10 anos). Os resultados também mostram que as incertezas crescem proporcionalmente com o período de retorno, o que sugere uma necessidade de maior rigor na determinação de IDF de projetos de infraestrutura que levam em consideração grandes períodos de retorno.

**ABSTRACT** – The identification of trends in extreme precipitation events led to the development of methodologies capable of determining the Intensity-Duration-Frequency Curves (IDF) considering non-stationarity events. This work aimed to quantify the uncertainties regarding the determination of IDF curves using stationary and non-stationary models, applied to historical series of precipitation in the Itajaí Basin. Bayesian Inference was used to approximate the distribution of the parameter values and the uncertainty quantification of the models. As a result, it has been shown that the stationary model underestimates the precipitation intensities for all durations and return periods investigated. However, when one takes into account the uncertainties, we see that the difference between the stationary and non-stationary models is clear only for small return periods (5-10 years). The results also show that the uncertainties grow proportionally with the return period, which suggests caution in the use of IDF for infrastructure projects that take into account large return periods.

**Palavras-Chave** – curvas idf, não estacionariedade, incertezas.

1) Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina. gabriel\_anzolin@hotmail.com

2) Department of Civil and Environmental Engineering, University of California Irvine, Irvine, California, USA. debora.ydo@gmail.com

3) Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina. pedro.chaffe@ufsc.br

## 1. INTRODUÇÃO

Diversos projetos de infraestrutura (galerias de drenagem pluvial, reservatórios e análise de suscetibilidade de movimento de massa) são idealizados com base na Chuva de Projeto, que é obtida por meio das Curvas de Intensidade-Duração-Frequência (IDF). Tradicionalmente, as Curvas IDF são calculadas considerando o conceito de estacionariedade, ou seja, quando não há tendência significativa ou mudança no regime de precipitação. Neste caso, assume-se que a probabilidade de ocorrência de eventos extremos não varia significativamente ao longo do tempo (CHENG; AGHAKOUCHAK, 2014).

Entretanto, segundo dados do Quinto Relatório de Avaliação do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC, 2014), desde 1960, as atividades antrópicas vêm contribuindo para alterar o ciclo hidrológico global. A principal causa desta alteração está associada a elevação da temperatura global, que aumenta a capacidade de retenção de água da atmosfera, intensificando o ciclo hidrológico e afetando os eventos de precipitação (RAGNO *et al.*, 2018). Portanto, espera-se que as mudanças climáticas alterem a intensidade, duração e frequência de eventos extremos. Esta alteração recebe o nome de não estacionariedade (CHENG; AGHAKOUCHAK, 2014).

Neste contexto, a identificação de mudanças no regime de eventos extremos de precipitação levou ao desenvolvimento de metodologias capazes de determinar as Curvas IDF considerando os eventos de não estacionariedade. Como tradicionalmente a maioria dos estudos relacionados às Curvas IDF não levam em consideração as incertezas associadas à sua determinação, este trabalho tem como objetivo a determinar as Curvas IDF por meio de modelos estacionário e não estacionário, com foco na estimativa das incertezas para séries históricas de precipitação da Bacia do Itajaí.

## 2. METODOLOGIA

### 2.1 Área de Estudo e Dados

A área de estudo é a Bacia do Itajaí, localizada na porção Centro Norte do Estado de Santa Catarina, com uma área na ordem de 15.000 km<sup>2</sup>. As séries históricas das estações pluviométricas foram obtidas a partir do Portal HidroWeb ([www.snirh.gov.br/hidroweb](http://www.snirh.gov.br/hidroweb)). Todas as estações de medição são de responsabilidade da Agência Nacional de Águas (ANA) e de operação da Empresa de Pesquisa Agropecuária e Extensão Rural de Santa Catarina (EPAGRI/SC). Do total de séries disponíveis, foram consideradas apenas aquelas com ao menos 30 anos de dados e com no máximo 10% de falhas nas medições. Este procedimento de seleção resultou em um total de 8 séries temporais. Por meio das séries históricas selecionadas, foram geradas séries de intensidade máxima anual para

as precipitações acumuladas de 1 a 7 dias. A localização da Bacia do Itajaí e das estações pluviométricas selecionadas neste estudo estão representadas na Figura 1.

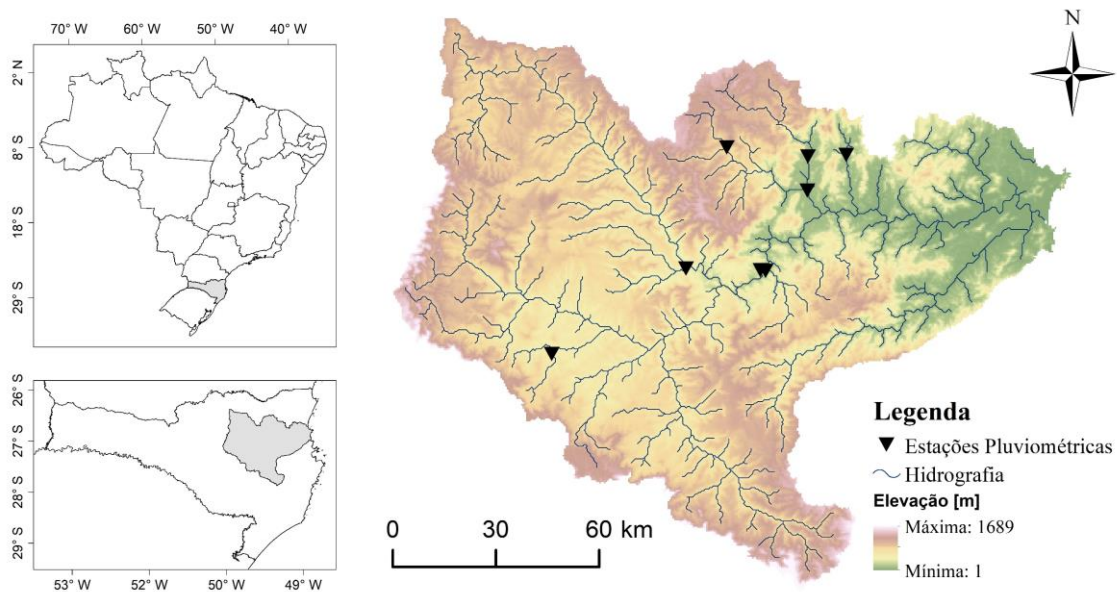


Figura 1 - Bacia do Itajaí e localização das estações pluviométricas selecionadas.

## 2.2 Distribuição Generalizada de Valor Extremo (GEV)

A distribuição Generalizada de Valor Extremo (GEV) é uma combinação de três distribuições estatísticas assintóticas de valor extremo máximo, sendo elas: Gumbel, Fréchet e Weibull. A função de probabilidades acumuladas  $\Psi(x)$  da distribuição GEV é dada pela Equação (1):

$$\Psi(x) = \exp \left\{ - \left[ 1 + \xi \left( \frac{x-\mu}{\sigma} \right) \right]^{-\frac{1}{\xi}} \right\} \quad (1)$$

onde  $\mu$  é o parâmetro de localização e representa o centro da distribuição,  $\sigma$  é o parâmetro de escala e representa a distribuição dos dados em torno de  $\mu$ , e  $\xi$  é o parâmetro de forma e descreve o comportamento da cauda da distribuição.

Dois modelos foram considerados neste estudo: modelo estacionário, em que os parâmetros da distribuição são assumidos como sendo constantes; e modelo não estacionário. Neste último, considerou-se que a média ( $\mu$ ) da distribuição aumenta ou diminui linearmente ao longo do tempo, i.e.,  $\mu(t) = \mu_1.t + \mu_0$ . O modelo estacionário possui três parâmetros a serem inferidos,  $\theta = (\mu, \sigma, \xi)$ , enquanto o modelo não estacionário possui quatro parâmetros,  $\theta = (\mu_0, \mu_1, \sigma, \xi)$ .

## 2.3 Análise de Tendência

O teste de Mann-Kendall (Mann, 1945; Kendall, 1975) foi utilizado para verificar a existência de tendência gradual nas séries de intensidade máxima anual. É um teste não paramétrico, ou seja,

não exige distribuição normal dos dados. Suas premissas são: independência da série e constância de sua distribuição (homoscedasticidade). O teste foi aplicado com nível de significância  $\alpha = 0,05$ . Sempre que houver a identificação de tendência significativa em todas séries de uma mesma estação pluviométrica, a média ( $\mu$ ) da distribuição GEV é estimada de acordo com o pressuposto não estacionário. A aplicação deste teste visou evitar a implementação de uma análise de valor extremo não estacionário de forma desnecessária.

## 2.4 Inferência dos Parâmetros

Neste trabalho, a inferência Bayesiana foi utilizada para a obtenção dos parâmetros dos modelos estacionário e não estacionário. Essa abordagem permite a estimativa de uma distribuição probabilística de valores dos parâmetros e não um único valor (OLIVEIRA *et al.*, 2018). Assim, além da análise de frequência de extremos, é possível quantificar incertezas. Segundo o Teorema de Bayes, a distribuição a posteriori dos parâmetros  $P(\theta | y)$  é proporcional a distribuição a priori  $P(\theta)$  e da função de verossimilhança  $P(y|\theta)$ , i.e.,

$$P(\theta|y) \propto P(\theta).P(y|\theta) \quad (2)$$

A distribuição a priori resume a informação disponível a respeito dos valores dos parâmetros antes da análise dos dados disponíveis, a função de verossimilhança sumariza a informação fornecida pelos dados utilizados na inferência e  $y = \{y_1, y_2, \dots, y_n\}$  é a série de intensidade máxima anual.

Para obter a aproximação da distribuição a posteriori dos parâmetros dos modelos, utilizou-se o algoritmo DREAM<sub>(zs)</sub> (Vrugt 2016), baseado em Evolução Diferencial (DE-MC), que se trata de um amostrador do tipo Markov Chain Monte Carlo (MCMC). Foram utilizadas 3 cadeias de Markov, com 10.000 amostragens em cada uma. Os 50% dos valores iniciais de cada cadeia foram descartados, resultando em 15.000 valores para a distribuição a posteriori dos parâmetros. Uma distribuição uniforme foi aplicada como distribuição a priori dos parâmetros, e a função de verossimilhança é a própria distribuição GEV.

As intensidades de precipitação para diferentes períodos de retorno foram estimadas por meio do conjunto ótimo de parâmetros (conjunto de parâmetros que maximiza o valor da distribuição a posteriori), enquanto as incertezas foram sumarizadas através de intervalos de credibilidade de 95%. Para considerar a não estacionariedade, as intensidades de precipitação para diferentes períodos de retorno foram estimadas utilizando os valores dos parâmetros do modelo não estacionário ao final do período utilizado para inferência, ou seja, o aumento observado na média foi considerado, porém, não foi extrapolado.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A Figura 2 mostra as Curvas IDF calculadas pelo modelo estacionário e não estacionário para a estação pluviométrica Arrozeira (02649008), que apresentou tendência significativa em todas as intensidades máximas anuais. As faixas em vermelho e cinza claro representam a incerteza associada a determinação dos parâmetros dos modelos estacionário e não estacionário, respectivamente.

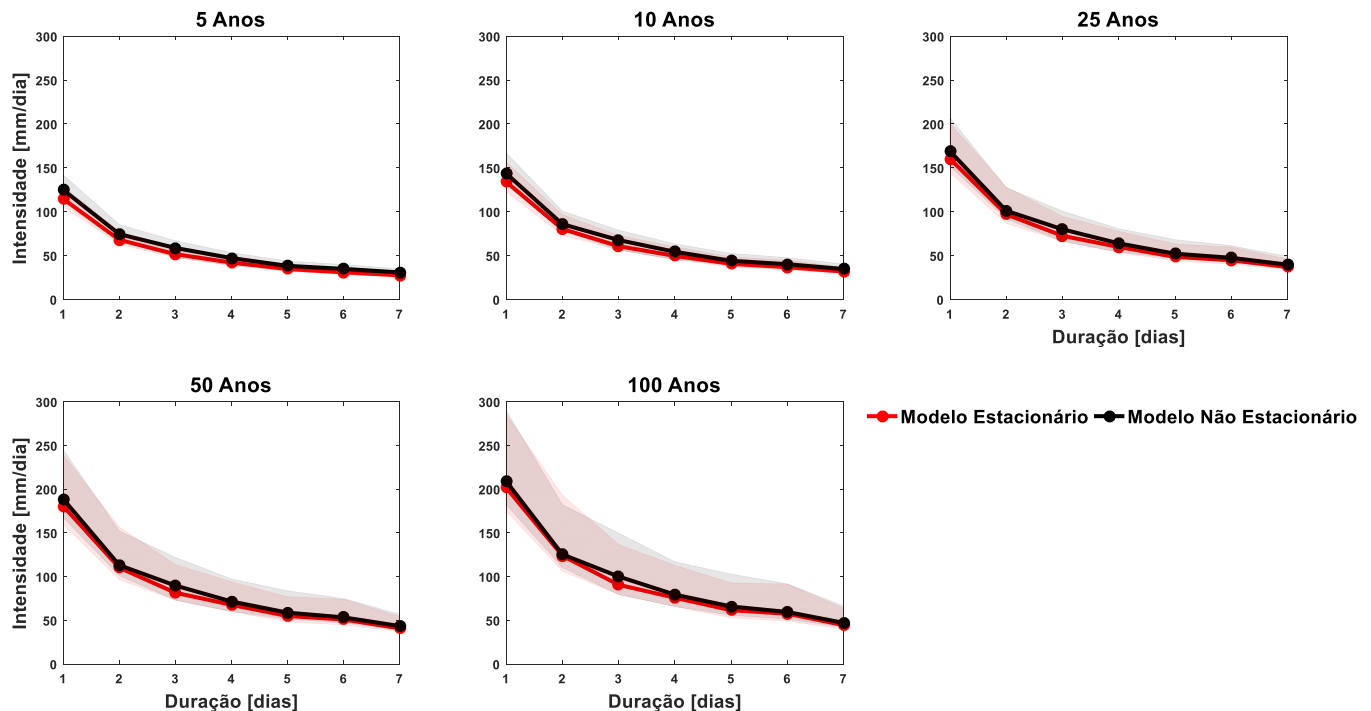


Figura 2 - Curvas IDF para a estação pluviométrica Arrozeira (02649008) para os modelos estacionário e não estacionário. As linhas vermelha e preta correspondem às intensidades de precipitação estimadas utilizando o conjunto ótimo de parâmetros para os modelos estacionário e não estacionário, respectivamente. As faixas em vermelho e cinza claro representam a incerteza associada a determinação dos parâmetros dos modelos estacionário e não estacionário, respectivamente.

Os resultados sugerem que o modelo estacionário subestima as intensidades de precipitação para todas as durações e períodos de retorno investigados. Este resultado se mostra coerente, uma vez que no modelo não estacionário a média da distribuição está aumentando ao longo do tempo (tendência positiva nas séries de intensidade máxima anual). Entretanto, quando se leva em consideração as incertezas, vemos que a diferença entre os modelos estacionário e não estacionário é clara apenas para pequenos períodos de retorno (5-10 anos). Para períodos de retorno superiores a 10 anos, as incertezas de ambos os modelos são bastante elevadas, o que dificulta a identificação de nuances entre as estimativas dos modelos.

Nas Figuras 3 e 4 estão apresentados os resultados para as Curvas IDF calculadas para todas as estações consideradas neste estudo pelo modelo estacionário e suas respectivas incertezas (vermelho claro) para os períodos de retorno de 5 e 100 anos, respectivamente.

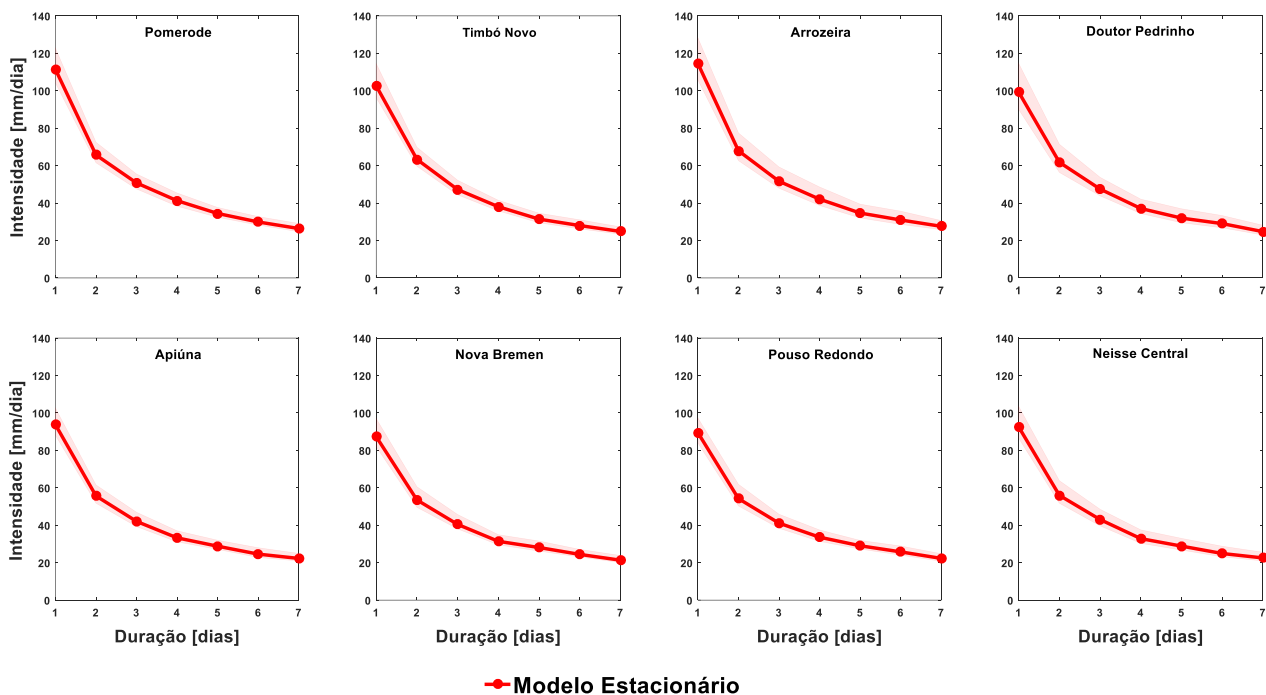


Figura 3 - Curvas IDF calculadas utilizando o modelo estacionário aplicado a diferentes estações pluviométricas para 5 anos de período de retorno. A linha vermelha corresponde às intensidades de precipitação estimadas utilizando o conjunto ótimo de parâmetros. A faixa em vermelho claro corresponde a um intervalo de credibilidade de 95%.

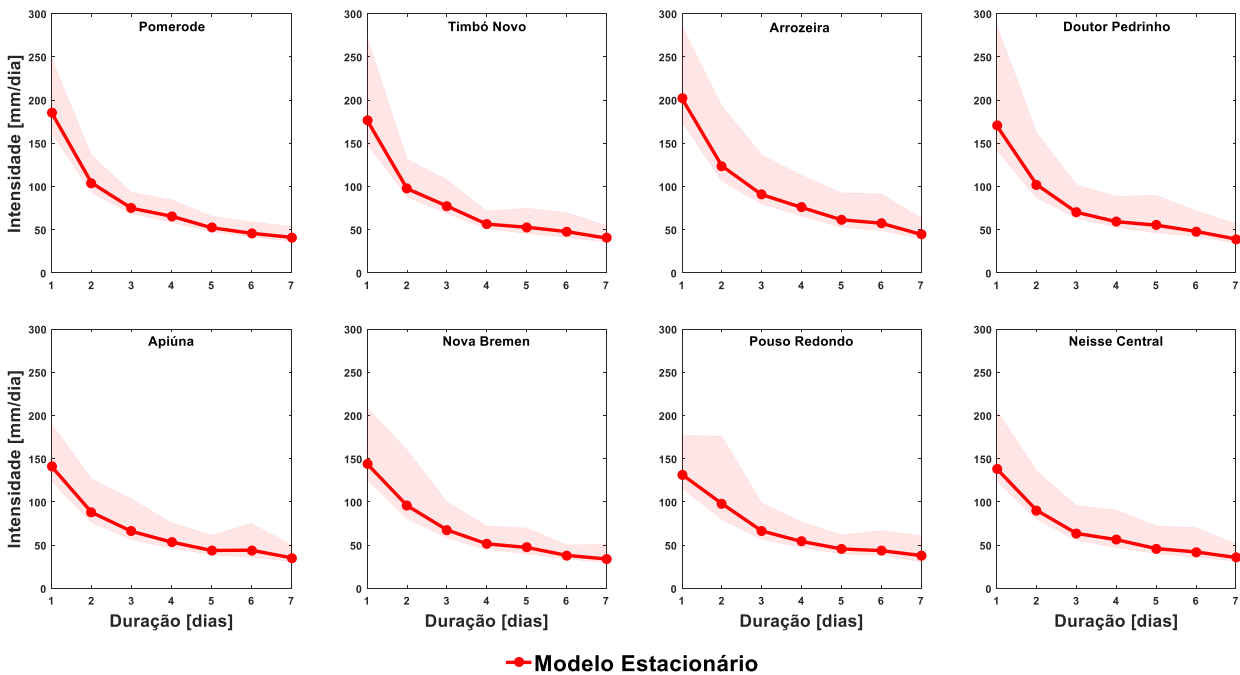


Figura 4 - Curvas IDF calculadas utilizando o modelo estacionário aplicado a diferentes estações pluviométricas para 100 anos de período de retorno. A linha vermelha corresponde às intensidades de precipitação estimadas utilizando o conjunto ótimo de parâmetros. A faixa em vermelho claro corresponde a um intervalo de credibilidade de 95%.

Por meio destes resultados, é possível acompanhar o comportamento e a evolução das incertezas nas estimativas das intensidades de precipitação conforme se aumenta o período de retorno. Percebe-se que períodos de retorno maiores estão associados a maiores incertezas. Na prática, isso significa que para projetos de infraestrutura que levam em consideração pequenos períodos de retorno (5-10 anos), como projetos de microdrenagem, estão menos suscetíveis a serem dimensionados erroneamente quando comparados com grandes projetos, como barragens, que levam em consideração elevados períodos de retorno e estão sujeitos a maiores incertezas. Isso sugere uma necessidade de maior rigor na determinação de IDF de projetos de infraestrutura que levam em consideração grandes períodos de retorno.

#### **4. CONCLUSÕES**

Neste trabalho, determinou-se as Curvas IDF considerando as incertezas acerca da estimativa das intensidades de precipitação pela aplicação de modelos estacionário e não estacionário a séries de intensidade máxima anual na Bacia do Itajaí. A inferência Bayesiana foi utilizada para determinar a distribuição dos valores dos parâmetros dos modelos e para quantificar as incertezas.

Para a estação pluviométrica Arrozeira (02649008), que apresentou tendência significativa para o teste de Mann-Kendall em todas as intensidades consideradas, as Curvas IDF foram calculadas para os modelos estacionário e não estacionário. O modelo estacionário subestima as intensidades de precipitação para todas as durações e períodos de retorno considerados. Entretanto, levando em consideração as incertezas, a diferença entre os modelos estacionário e não estacionário é clara somente para pequenos períodos de retorno (5-10 anos), já que para períodos de retorno superiores a 10 anos as incertezas são bastante acentuadas, impedindo a identificação de nuances entre os modelos. Portanto, quando há não estacionariedade e ela não é considerada, a construção de estruturas pode ser subdimensionada.

Para as demais estações foram calculadas as Curvas IDF e suas respectivas incertezas apenas utilizando o modelo estacionário. Os resultados mostram que as incertezas crescem proporcionalmente com o período de retorno. Portanto, projetos de infraestrutura que consideram pequenos períodos de retorno estão menos sujeitos a serem dimensionados de forma equivocada.

#### **AGRADECIMENTOS**

A segunda autora agradece à CAPES pela bolsa de Doutorado Pleno no Exterior - processo nº 88881.174456/2018-01.

## REFERÊNCIAS

- ANA - AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. HidroWeb: Sistema de Informações Hidrológicas. Disponível em: <http://hidroweb.ana.gov.br>. Acesso em 15 mar. 2019;
- Ragno, E., AghaKouchak, A., Love, C. A., Cheng, L., Vahedifard, F., & Lima, C. H. R. (2018). “*Quantifying changes in future Intensity-Duration-Frequency curves using multimodel ensemble simulations*”. *Water Resources Research*, 54, 1751–1764;
- KENDALL, M. G. *Rank Correlation Methods*. 4 ed. London: Charles Griffin, 1975;
- MANN, H. B. (1945). “*Nonparametric tests against trend*”. *Econometrica: Journal of the Econometric Society*, pp. 245-259;
- OLIVEIRA, D.Y., BARTIKO, D.; CHAFFE, P.L.B. “*Incerteza na análise de frequência de vazões máximas anuais utilizando modelos estacionário e não estacionário aplicados à região sul do Brasil*”. I Encontro Nacional de Desastres, Porto Alegre, 2018.
- VRUGT, J. A. (2016). *Markov chain Monte Carlo simulation using the DREAM software package: Theory, concepts, and MATLAB implementation*. *Environmental Modelling and Software*, v. 75, p. 273–316.
- IPCC. *Climate change 2014. Synthesis report*. Versión inglés. [s.l: s.n.].