

## SIMULAÇÃO DE VAZÕES MÁXIMAS DIÁRIAS ANUAIS A PARTIR DO MODELO PROBABILÍSTICO DE GUMBEL PARA A BACIA DA LAGOA MIRIM/RS

*Gustavo Bubolz Klumb<sup>1</sup>; Rita de Cássia Fraga Damé<sup>2</sup>; Claudia Fernanda Teixeira-Granda<sup>2</sup>; Patrick Veber<sup>1</sup>; Newton Timm<sup>1</sup>; Viviane Dorneles<sup>3\*</sup>; Emanuele Manke<sup>4</sup>; Luis Weymar Junior<sup>4</sup>; Gabriel Lemos<sup>4</sup>; Rosiane Couto<sup>4</sup>; Pamela Disconzi<sup>4</sup> & Letícia Mélo<sup>5</sup>.*

**Resumo** – Diante da carência de informações de dados observados de vazão, objetivou-se analisar a influência no resultado final da variável de projeto para determinados períodos de retorno, entre séries de dados observados ajustados ao modelo probabilístico de Gumbel e séries sintéticas, obtidas a partir do ajuste da mesma distribuição. Para tanto foram construídas séries anuais de vazões máximas diárias das estações Cerro Chato, Passo dos Carros, Ponte Cordeiro Farias e Pedro Osório, pertencentes à bacia hidrográfica da Lagoa Mirim/RS, denominadas de históricas. Após, foi utilizado o ajuste da distribuição teórica de probabilidade de Gumbel para os valores das séries históricas e, na sequência, gerada uma série sintética de vazões, com 1.000 números pseudoaleatórios das vazões máximas e extraída uma série com 100 anos. Para verificar as diferenças significativas dos valores de vazão de projeto entre as séries históricas e as séries sintéticas, foi aplicado o teste “t” de *Student*, o erro relativo médio quadrático e o teste de aderência Kolmogorov-Smirnov. Diante dos resultados obtidos, foi comprovado que não existe influência significativa na utilização de séries sintéticas, comparativamente às observadas. No entanto, os valores de vazões de projeto são superestimados para períodos de retorno acima de 20 anos.

**Palavras-Chave** – Extensão de séries; séries sintéticas; distribuição teórica de probabilidade.

## SIMULATION OF ANNUAL SERIE OF DAILY PEAK FLOWS FROM GUMBEL’S PROBABILISTIC MODEL FOR THE LAGOA MIRIM’S BASIN

**Abstract** – Due to the lack of information from the flow data, the study goal was to analyze the final result influence on the project variable for certain return periods, between adjusted observed data series to the probabilistic Gumbel’s model and synthetic series obtained from the adjust on the same distribution. For this purpose, it was built an annual serie of daily peak flows from the stations of Cerro Chato, Passo dos Carros, Ponte Cordeiro Farias and Pedro Osório, all of them belonging to the hydrographic basin of Lagoa Mirim/RS, denominated as historical. After that, Gumbel’s theory of distribution was used to achieve the historical series values and, in sequence, the creation of a synthetic flow serie with 1000 pseudorandom numbers of the maximum flow values and generating an one hundred years serie. To verify the significant differences of the flow values between the historical series and the synthetic ones, it was applied the “t” test from *Student*, the quadratic related medium error and the adherence test Kolmogorov-Smirnov. The results proved the inexistence of significant influence in the use of synthetic series when compared to the historical ones. However, the project flow values are super estimated for return periods above 20 years.

**Keywords** – Extension series; Project variable; Gumbel adjustment.

<sup>1</sup>Graduandos do Curso de Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Pelotas, gustavo19klumb@hotmail.com, patrick.veber@hotmail.com, newton.silva.timm@hotmail.com.

<sup>2</sup>Profa. Doutora Associada, Centro de Engenharias, Universidade Federal de Pelotas, ritah2o@hotmail.com, cfteixe@ig.com.br.

<sup>3</sup>\*Doutoranda no Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos, Universidade Federal de Pelotas, vivianerdorneles@gmail.com.

<sup>3</sup>Eng. Agrícola. maarcosr@unal.edu.co.

<sup>4</sup>Doutorandos no Programa de Pós-Graduação em Manejo e Conservação do Solo e da Água, Universidade Federal de Pelotas, manumanke@gmail.com, lweymarjr@gmail.com, gabriel.faem@gmail.com, couto.rosianes@gmail.com, pamelabilhafan@gmail.com.

<sup>5</sup>Mestranda no Programa de Pós-Graduação em Manejo e Conservação do Solo e da Água, Universidade Federal de Pelotas, leticia-burkert@hotmail.com.

## INTRODUÇÃO

Para projetos de estruturas hidráulicas, sejam eles para fins de irrigação, controle de inundações, geração de energia elétrica, entre tantos outros, faz-se necessário o conhecimento da vazão de projeto. No entanto, a disponibilidade de dados de vazão é precária, devido a seu elevado custo de obtenção, comparativamente aos dados de precipitação (Ludwig *et al.*, 2014).

Dessa forma, para projetos de obras hidráulicas se faz necessário estimar a vazão de projeto, que pode ser realizada a partir de séries de vazões históricas ou mediante transformação de séries de precipitação em séries de vazão, por modelos hidrológicos do tipo chuva-vazão (Santos *et al.*, 2001).

Os eventos hidrológicos seguem algum tipo de distribuição teórica de probabilidade, em que os parâmetros do modelo podem ser usados para estimar um evento, para uma determinada magnitude, com uma probabilidade de ocorrência (Damé *et al.*, 1996). Entretanto, não há uma teoria suficientemente firme para justificar o uso de uma ou outra distribuição, mas existem algumas justificativas teóricas para a aplicação das distribuições de Gumbel, log-Pearson e log-Normal para a análise de valores extremos. Como a distribuição de Gumbel tem tido grande aplicação para estudos de eventos extremos, a mesma pode ser utilizada para o cálculo das vazões de projeto.

Caso a vazão de projeto seja determinada a partir dos dados observados para um determinado período de retorno (TR), a série deve ser representativa, estacionária e com valores independentes e, só após a análise de consistência é que são estimadas, por meio de modelos teóricos de probabilidade, as vazões associadas aos períodos de retorno de interesse do projeto (Zanetti *et al.*, 2006).

O período de retorno é um parâmetro fundamental para o projeto e avaliação de sistemas hídricos, como reservatórios, canais, vertedores, bueiros, galerias de águas pluviais, etc. (Graciosa, 2010).

A bacia hidrográfica da lagoa Mirim está localizada no sul do Rio Grande do Sul, sendo uma bacia transfronteiriça Brasil/Uruguai, considerada fundamental para o desenvolvimento econômico da região, em virtude, especialmente, do cultivo de arroz irrigado.

No inventário disponível, existem em torno de 12 postos que possuem informações de níveis e vazão, mas com muitas falhas (ANA, 2016). Neste contexto, a série de vazão histórica consistida com um determinado comprimento pode ser utilizada para gerar, a partir de um modelo probabilístico, uma série sintética com comprimento maior de anos, mantendo as características estatísticas da série histórica (Collischonn e Tucci, 2003).

Estão inseridas na bacia da lagoa Mirim a bacia do arroio Pelotas, arroio Fragata, rio Piratini e arroio Basílio, que possuem as respectivas seções de controle na estação Ponte Cordeiro de Farias (88850000), Passo dos Carros (88750000), Pedro Osório (88641000) e Cerro Chato (88575000), constituindo um importante manancial de água doce, tanto para a zona rural como para a urbana (Beskow *et al.*, 2010).

Assim, diante da carência de informações de dados observados de vazão, objetivou-se analisar a influência no resultado final da variável de projeto, para determinados períodos de retorno, entre uma série de dados observados, ajustada ao modelo probabilístico de Gumbel, e uma série sintética para extensão de dados, para vazões máximas diárias anuais de algumas estações localizadas na bacia da lagoa Mirim/RS.

## MATERIAL E MÉTODOS

Foram utilizados dados fluviométricos obtidos a partir do banco de dados Hidroweb - Agência Nacional de Águas (ANA), cujas informações de código, nome da estação, coordenadas geodésicas, altitude e período encontram-se na Tabela 1. A partir dos valores diários foram constituídas as séries de vazões máximas diárias anuais, considerando-se o ano hidrológico que, segundo Tucci (2004), no Rio Grande do Sul inicia em maio e termina em abril.

Tabela 1. Estações Fluviométricas pertencentes à bacia da lagoa Mirim/RS

Código	Nome da Estação	Latitude	Longitude	Altitude (m)	Período
88575000	Cerro Chato	-31°51'53''	-53°16'06''	115	2000-2015
88750000	Passo dos Carros	-31°42'50''	-52°28'36''	10	1989-2004
88850000	Ponte Cordeiro Farias	-31°34'25''	-52°27'45''	40	1975-1990
88641000	Pedro Osório	-31°51'40''	-52°49'01''	40	2000-2015

As séries de dados de vazão foram montadas de modo que apresentassem a mesma extensão, ou seja, 16 anos para todas as estações, já que foi o maior período de informações sem falhas nos dados.

As probabilidades empíricas acumuladas foram determinadas pela fórmula de Weibull (Equação 1).

$$P(X \geq x) = \frac{i}{N + 1} \quad (1)$$

em que:

$P(X \geq x)$  é a probabilidade de excedência;

$i$  a ordem dos elementos e,

$N$  o número de observações.

Os valores das séries de vazão das quatro estações utilizadas foram ajustados à distribuição Gumbel, utilizando-se o método Chow-Gumbel (Equação 2) (Charles, 2010).

$$X_{Tr} = \bar{X} + K_{Tr} \cdot S \quad (2)$$

em que:

$X_{Tr}$  - vazão de projeto para determinado período de retorno ( $m^3 s^{-1}$ );

$\bar{X}$  e  $S$  - média e desvio padrão dos valores observados, respectivamente ( $m^3 s^{-1}$ );

$K_{Tr}$  - fator de frequência para a distribuição utilizada.

A extensão da série foi obtida usando o ajuste da distribuição de Gumbel para os valores da série histórica, com os parâmetros sendo ajustados pelo método dos momentos (Hann, 1979), conforme as Equações 3 e 4.

$$\vartheta = \frac{\sqrt{6 \times S^2}}{\pi} \quad (3)$$

$$\beta = \mu - 0,5772 \times \vartheta \quad (4)$$

em que:

$\mu$  e  $S^2$  - média e a variância amostral, respectivamente;

$\vartheta$  e  $\beta$  - parâmetros de escala e de forma, respectivamente.

A obtenção dos valores de vazão máxima ( $Q_{\text{máx}}$ ) para os períodos de retorno (TR) de 2, 10, 20, 50, 100, 500, 1000 e 10000 anos foram obtidos mediante a Equação 5.

$$Q_{\text{máx}} = \beta - \vartheta \times \ln \left[ -\ln \left( 1 - \frac{1}{\text{TR}} \right) \right] \quad (5)$$

Na sequência foi gerada uma série sintética de vazões com 1000 números pseudoaleatórios, com distribuição uniforme, entre 0 e 1, representando a probabilidade de ocorrência ( $P = 1/\text{TR}$ ) das vazões máximas. Da série sintética foi extraída uma série parcial de 100 anos e a partir dela, realizada 10 simulações. Em seguida, para cada uma das séries simuladas, com diferentes extensões, foi ajustada a mesma distribuição de probabilidade de Gumbel. Deste modo, foi possível estimar as vazões máximas para os mesmos TR's utilizados anteriormente.

Para verificar as diferenças significativas, em um nível de probabilidade de  $\alpha=5\%$ , entre os valores de vazão máxima observados e os gerados a partir de 1.000 valores sintéticos, com distribuição de Gumbel, foi aplicado o teste "t" de *Student*, testando-se a hipótese de nulidade ( $H_0$ ), para o coeficiente angular ( $\beta_1$ ). Assim, se a estatística do teste "t" for inferior aos valores de "t" crítico, para um nível de probabilidade ( $1 - \alpha$ ), aceita-se  $H_0$  e entende-se que não há diferença significativa entre as séries (Damé *et al.*, 2008).

Uma vez ajustado o modelo probabilístico de Gumbel para as séries observada e sintética e estimadas as vazões máximas para os TR's utilizados, as vazões máximas resultantes das séries foram comparadas utilizando o método gráfico, o teste de aderência de Kolmogorov-Smirnov (Queiroz *et al.*, 2014) e o erro relativo médio quadrático (RMS), apresentado por Câmara *et al.* (2016), conforme a equação 6.

$$RMS = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \left( \frac{X_{\text{sint}} - X_{\text{obs}}}{X_{\text{obs}}} \right)^2}{N}} \quad (6)$$

em que:

RMS - erro relativo médio quadrático;

$X_{\text{sint}}$  e  $X_{\text{obs}}$  - valores de vazão da série sintética e da série observada para um dado período de retorno, respectivamente;

N - número de observações.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

A partir da Tabela 2 observa-se pelos resultados da estatística "t" de *Student* para os coeficientes angulares ( $\beta_1$ ), que não há diferença significativa para um nível  $\alpha = 5\%$ , entre os valores de vazões obtidos a partir das séries históricas, comparativamente com as séries sintéticas. Em todas as comparações, foi visto que  $t_{\text{crit}} > t_{\text{calc}}$ , o que permite concluir que não há diferença significativa entre os valores de vazões máximas observadas e simuladas, para os períodos de retorno pré-estabelecidos, aceitando-se  $H_0$ .

Tabela 2. Valores da estatística do teste “t” de *Student* para as estações em estudo

Estação	$t_{\text{calc}} (\alpha = 5\%)$	$t_{\text{crit}} (\alpha = 5\%)$	Conclusão
Cerro Chato	0,05	2,36	Aceita $H_0$
Passo dos Carros	0,02	2,36	Aceita $H_0$
Ponte Cordeiro Farias	0,06	2,36	Aceita $H_0$
Pedro Osório	0,07	2,36	Aceita $H_0$

Na Tabela 3 são apresentados os valores do teste de Kolmogorov-Smirnov para as quatro séries de vazões máximas diárias anuais, ajustadas à distribuição de Gumbel. A partir dos dados das estatísticas do teste observa-se que aceita-se a hipótese de que os dados de vazão provêm da mesma população, uma vez que todos os valores de  $D_{\text{crit}}$  foram maiores do que  $D_{\text{calc}}$ .

Tabela 3. Valores da estatística do teste de Kolmogorov-Smirnov, a distribuição de probabilidade Gumbel para as séries observada e sintética, para um nível de probabilidade de 5% de erro.

Estação	Série Observada		Série Sintética	
	$D_{\text{crit}}$	$D_{\text{calc}}$	$D_{\text{crit}}$	$D_{\text{calc}}$
Cerro Chato	0,330	0,161	0,136	0,070
Passo dos Carros	0,330	0,214	0,136	0,056
Ponte Cordeiro Farias	0,330	0,187	0,136	0,044
Pedro Osório	0,330	0,137	0,136	0,044

Observa-se nas Figuras 1 e 2 o comparativo entre as vazões de projeto da série histórica com a série sintética, para as estações em estudo. Na Figura 1, em que o TR é até de 10.000 anos e na Figura 2 até 100 anos, observa-se que para o período de retorno de 2 anos, em todas as estações, a série sintética subestima os valores de vazão de projeto, e após o TR de 20 anos, a série de dados observados acaba por superestimar os valores de vazão máxima, e esse comportamento segue até o TR de 10.000.

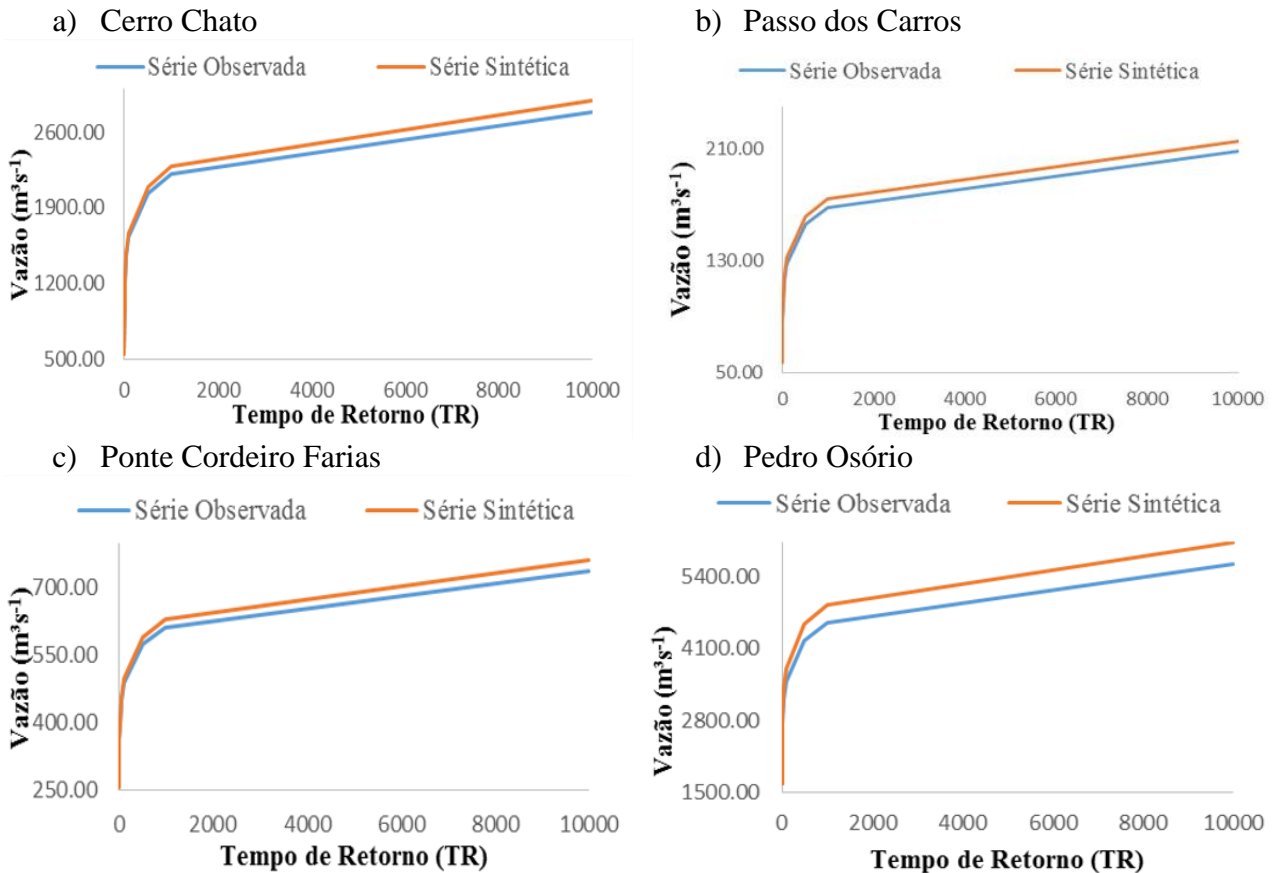


Figura 1 – Vazão de projeto ( $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$ ) em função dos períodos de retornos até 10000 anos obtidos a partir das séries Cerro Chato, Passo dos Carros, Ponte Cordeiro Farias e Pedro Osório.

Para uma obra hidráulica como um extravasor de uma barragem de terra, por exemplo, é de conhecimento que o período de retorno admitido para esse tipo de obra é de 1.000 anos (Tucci, 2004). Dessa forma, para um TR de 1.000 anos, a série sintética superestima 3,43% o valor de vazão de projeto, comparativamente à série observada, para a estação Cerro Chato, 3,47% para o Passo dos Carros, 2,74% e 6,71% para Ponte Cordeiro Farias e Pedro Osório, respectivamente.



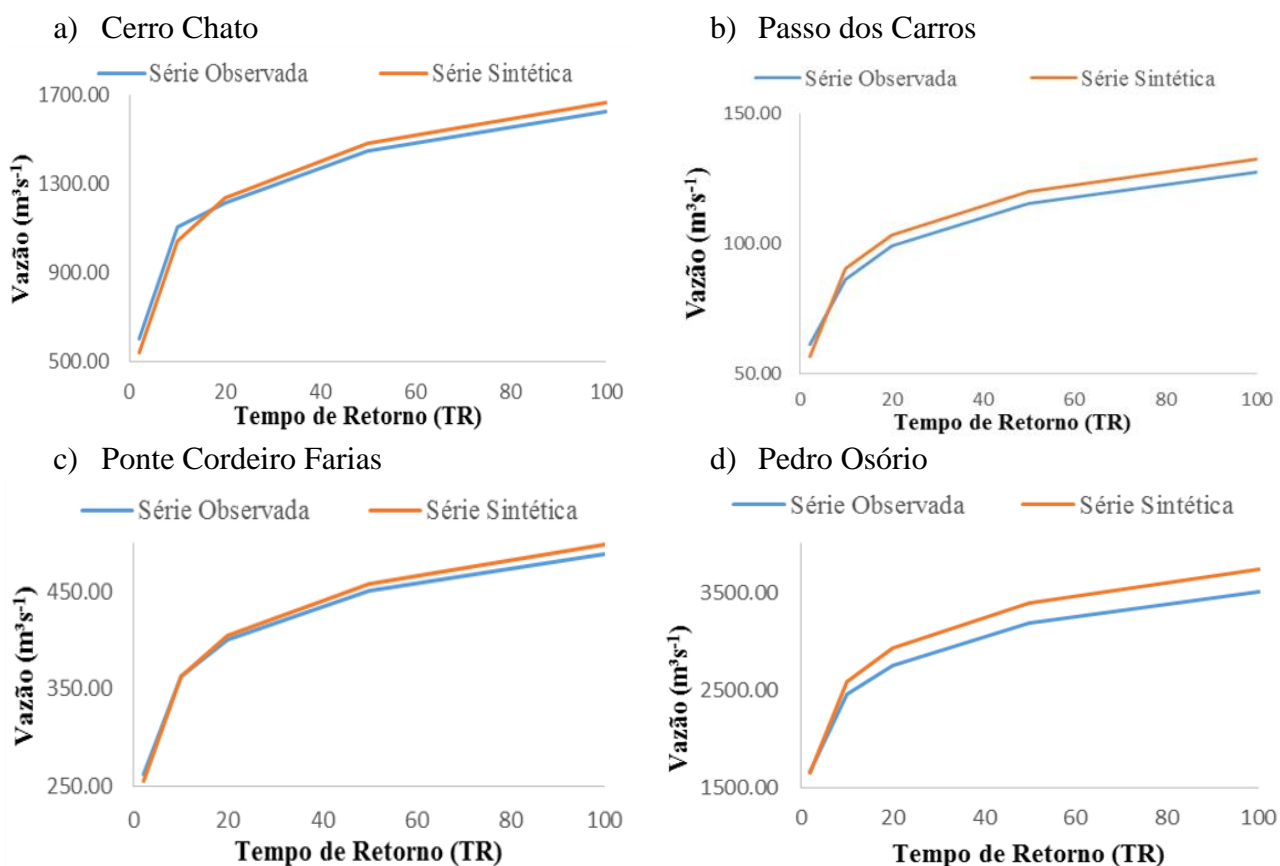


Figura 2 – Vazão de projeto ( $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$ ) em função dos períodos de retornos até 100 anos obtidos a partir das séries de Cerro Chato, Passo dos Carros, Ponte Cordeiro Farias e Pedro Osório.

Os valores de erro relativo médio quadrático obtidos entre os valores de vazão associados aos períodos de retorno obtidos das séries observadas, comparativamente às séries sintéticas de 100 anos são apresentados na Tabela 4. Observa-se que para a estação de Cerro Chato e Passo dos Carros, têm-se um erro de 5%, já para Ponte Cordeiro Farias um erro de 2%, e de 6% para a estação de Pedro Osório, essas duas estações foram as que apresentaram o menor e o maior erro dentre os postos estudados.

Tabela 4. Valores do erro relativo médio quadrático (RMS).

Estação	RMS
Cerro Chato	0,05
Passo dos Carros	0,05
Ponte Cordeiro Farias	0,02
Pedro Osório	0,06

## CONCLUSÃO

Para as séries de vazões máximas diárias das estações de Cerro Chato (88575000), Passo dos Carros (88750000), Ponte Cordeiro Farias (88850000) e de Pedro Osório (88641000), pertencentes à Lagoa Mirim, foi comprovado que não existe influência significativa na utilização de séries sintéticas, comparativamente às séries observadas. Entretanto, os resultados mostram que para as séries sintéticas acabam por superestimar os valores de vazões de projeto para obras hidráulicas com períodos de retorno acima de 20 anos.

A estação Ponte Cordeiro Farias foi a que apresentou os melhores resultados, o menor erro e a série sintética apresentou os resultados mais similares aos da série observada, e o posto de Pedro Osório, que mais diferiu nos resultados de vazão de projeto.

## REFERÊNCIAS

- BESKOW, S.; COELHO, G.; TIMM, L. C.; TAVARES, V. E. Q.; DAME, R. C. F. (2010). Caracterização morfométrica da bacia hidrográfica do arroio Pelotas (RS): base para estudos hidrológicos. In *Anais do IX Congresso Latinoamericano y del Caribe de Ingeniería Agrícola – CLIA 2010 e XXXIX Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola – CONBEA 2010*, Vitória, jul. 2010.
- CHARLES, N. C. (2010). Prediction of rainfall magnitudes and variations in Nigeria. *Nigerian Journal of Technology*, 29 (2), pp. 46-53.
- COLLISCHONN, W.; TUCCI, C. E. M. Ajuste Multiobjetivo dos Parâmetros de um Modelo Hidrológico. (2003). *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, pp. 27-39.
- DAMÉ, R. C. F.; TEIXEIRA, C. F. A.; SOUTO, M. V.; MOREIRA, N. M. (1996). Análise de frequência hidrológica dos dados de precipitação pluvial de algumas estações agroclimatológicas da região sul do Rio Grande do Sul. *Ciência Rural*, 26 (3), p. 351-355.
- DAMÉ, R. C. F.; TEIXEIRA, C. F. A.; TERRA, V. S. S. (2008). Comparação de diferentes metodologias para estimativa de curvas intensidade-duração-freqüência para Pelotas – RS. *Engenharia Agrícola*, 28 (2), pp. 245-255.
- GRACIOSA, M. C. P. Modelo de seguro para riscos hidrológicos com base em simulação hidráulico-hidrológica como ferramenta de gestão do risco de inundações. *Tese (Doutorado em Hidráulica e Saneamento) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2010*. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18138/tde-13082010-102943/>>. Acesso em: 2017-05-10.
- HAAN, C. T. Statistical methods in hydrology. Ames: *The Iowa State University*, 1979. 377 p.
- LUDWIG, R.; SILVA, D. M.; DAMÉ, R. C. F.; TEIXEIRA, C. F. A. (2014). Comparação entre metodologias para estimativa de vazão em canal de irrigação no arroio Chasqueiro/RS. *Irriga*, 19 (1), pp. 94-102.
- QUEIROZ, M. M. F.; DANTAS, I. A. M.; NASCIMENTO, K. N. F. (2014). Frequência de cheias no rio Piancó Piranhas-açu, segundo distribuição GEV e momentos LH. *Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável*, 9 (5), pp. 18-23.
- SANTOS, R.; TUCCI, C.; SILVEIRA, A.; FILHO, A. S. M. (2001). Estimativa do hidrograma de projeto com base na incerteza dos parâmetros do modelo. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, p. 29-41.
- TUCCI, C. E. M. (2004) Hidrologia: Ciência e Aplicação. Editora UFRGS, 943 p.
- ZANETTI, S. S.; OLIVEIRA, V. P. S.; PRUSKI, F. F. (2006). Validação do modelo ClimaBR em relação ao número de dias chuvosos e à precipitação total diária. *Engenharia Agrícola*, Jaboticabal, pp. 96-102.