XXI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS
Segurança Hídrica e Desenvolvimento Sustentável: desafios do conhecimento e da gestão
De 22 a 27 de novembro de 2015, Brasília – DF

ANÁLISE ESTATÍSTICA DE VAZÕES EXTREMAS EM 3 MUNICÍPIOS NA BACIA DO RIO ITAJAÍ

Gustavo Andrei Speckhann [1] *& Pedro Luiz Borges Chaffe** [2] *& Roberto Fabris Goerl* [3]

Resumo – As inundações são fenômenos naturais que tem afetado a humanidade desde a antiguidade. O estado de Santa Catarina possui um histórico de tragédias e dificuldades devido a esse fenômeno, em especial a região do Vale do Itajaí, localizado na bacia hidrográfica do Rio Itajaí. O objetivo deste estudo foi analisar as vazões de extremo dos municípios de Blumenau, Gaspar e Ilhota utilizando os dados fluviométricos. Para realizar a análise foram utilizados as distribuições de extremo Normal, Log Normal, Gumbel e Log Pearson tipo 3. Para critério de avaliação das distribuições foi empregado o processo de validação denominado *Jackknife* para calcular o Erro Padrão e *Bias* do coeficiente de correlação das distribuições aplicadas. Os resultados obtidos demonstraram que todas as distribuições de extremo aplicadas foram consideradas satisfatórias na descrição do fenômeno de vazões extremas, sendo o maior erro de correlação calculado 7%. As obras hidráulicas realizadas na bacia, assim como a mudança no uso e ocupação do solo são fatores que podem alterar significativamente o alcance das cheias e o respectivo tempo de retorno.

Palavras-Chave – Distribuição de Extremo, Inundação, Jackknife

STATISTICAL ANALYSIS OF EXTREME FLOW AT 3 CITIES LOCATED IN ITAJAÍ BASIN

Abstract – Floods are natural phenomena which have affected the humanity since the ancient times. The state of Santa Catarina has a history of tragedies and difficulties due to this phenomenon, especially the region of Vale do Itajaí, located in the basin of Rio Itajaí. The object of this study was to analyze the extreme flows values of the cities of Blumenau, Gaspar and Ihota using the streamflow data. To perform the analysis, were used the extreme distributions Normal, Log-Normal, Gumbel and Log Pearson type 3. The criteria applied to evaluate the distributions, was a validation process called *Jackknife*, which was used to calculate the Standard Error and Bias of the correlation coefficient of the distributions applied. The results showed that all extreme distributions applied were considered satisfactory in describing the phenomenon of extreme flows, the highest correlation error obtained was 7%. Hydraulic works carried out in the basin, as well as the change in land use and occupation, are factors that can significantly alter the scope of floods and their return period.

Keywords – Extreme Analysis Distribution, Inundation, Jackknife.

INTRODUÇÃO

As inundações são fenômenos naturais que afetam a vida da humanidade desde a antiguidade (Tung, 2002). O Estado de Santa Catarina têm sofrido com esse fenômeno, fato que tem gerado muitas perdas. Durante o período entre 1980 e 2010, ocorreram 1257 casos de inundações bruscas no Estado de Santa Catarina (Marcelino et al., 2014). Estima-se que as inundações bruscas em conjunto com escorregamentos, durante o período de 2000-2010, resultaram em um total de 154 mortes e 58.323 pessoas desabrigadas.

[1] Curso de Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC - gustavo.speckhann@grad.ufsc.br
[2] Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC - pedro.chaffe@ufsc.br
[3] Campus Curitibanos, Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC – roberto.f.goerl@ufsc.br

Em virtude das inundações serem um fenômeno natural e do potencial de dano associado ao fenômeno, várias são as tentativas de prever a ocorrência das inundações. De acordo com Savage et al.,(2014) o método mais comumente utilizado na previsão inundações é o uso de modelos hidráulicos, no entanto existe uma tendência de automatizar o processo de mapeamento através do Sistema de Informações Geográficas (SIG), fato esse que tem propiciado o desenvolvimento de mapas de inundação georreferenciados, os quais são espacialmente mais corretos (Nodolf et al., 2008).

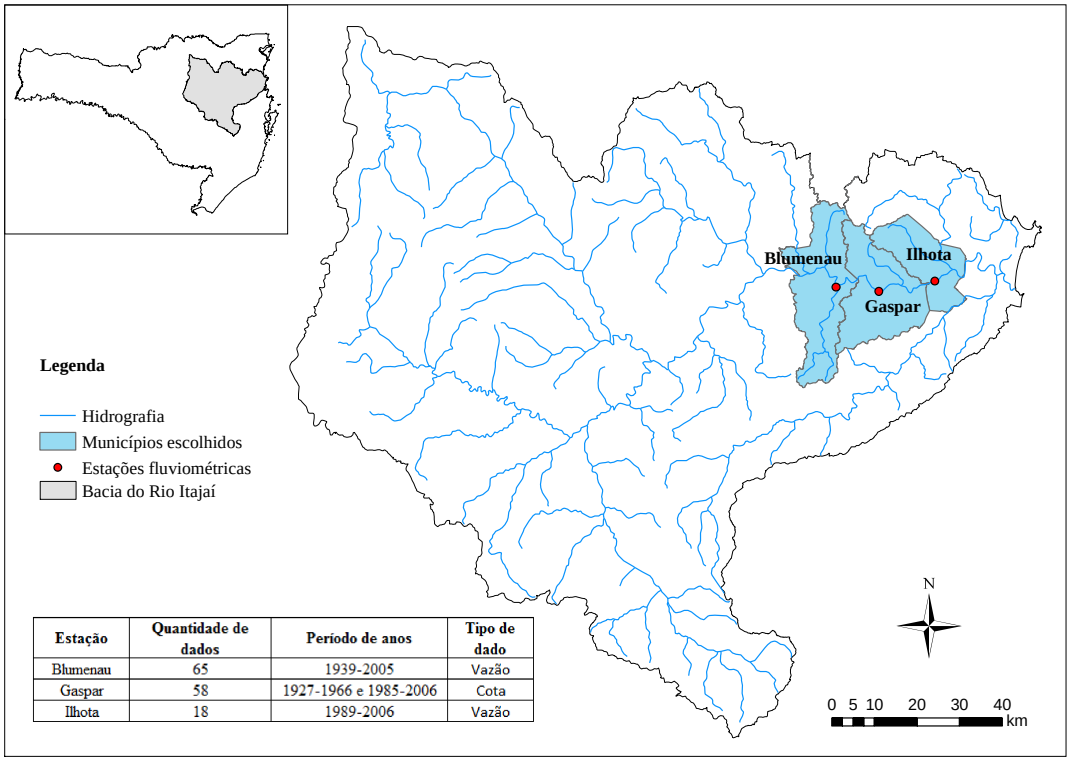
Compreender os fenômenos extremos através do estudo estatístico das informações fluviométricas e pluviométricas tem sido uma alternativa. Neste trabalho a análise de vazões extremas foi feita aplicando as distribuições de extremo: Normal, Log Normal, Gumbel e Log Pearson tipo 3, procedendo a validação das distribuições através de um processo de validação chamado *Jackknife*.

MATERIAIS E MÉTODOS

Área de Estudo

A área de estudo está localizada na região Sul do Brasil, no Estado de Santa Catarina. Os municípios selecionados foram Blumenau, Gaspar e Ilhota (Figura 1). Um dos critérios de seleção foi a ocorrência de inundações, a qual tem se repetido nos últimos anos e o fato de todos os municípios possuírem 1 rio em comum, o rio Itajaí-Açu. Estima-se que somente em Blumenau, desde 1852 foram registrados 77 eventos com cota superior a 8,00m (Frank e Pinheiro, 2003).

Os dados fluviométricos utilizados foram obtidos por meio do sistema de informação hidrológica da Agência Nacional de Águas (ANA). A Figura 1 apresenta a quantidade de dados disponíveis nos municípios escolhidos para o estudo juntamente com o mapa de localização dos municípios na bacia. Nota-se que a estação do município de Gaspar não possui dados de vazão (m^3/s) e em virtude disso, foram utilizados dados de cota (cm).



Estação	Quantidade de dados	Período de anos	Tipo de dado
Blumenau	65	1939-2005	Vazão
Gaspar	58	1927-1966 e 1985-2006	Cota
Ilhota	18	1989-2006	Vazão

Figura 1 - Mapa de localização dos municípios e quantidade de dados disponíveis para cada estação

Estudo de cheias

Devido à crescente urbanização dos municípios e o aumento da população, Blumenau, por exemplo, registrou um aumento de 200 mil habitantes somente nas ultimas 3 décadas (Refosco et al., 2013), a previsão e o controle de cheias são ferramentas muito importantes para a prevenção de desastres naturais.

Com o intuito de compreender a ocorrência de vazões procedeu-se o estudo estatístico de vazões extremas. Neste estudo, foram aplicadas 4 distribuições Normal, Log Normal, Gumbel e Log Pearson tipo 3.

A distribuição Normal é umas das distribuições mais comumente aplicadas em hidrologia. A aplicação em hidrologia se dá em fenômenos que possuem comportamento bem definido – variável que flutua de forma simétrica em torno de um valor central, como por exemplo: média anual de vazão, ou carga anual de poluentes (Naghettini e Pinto, 2007). A distribuição Normal possui como parâmetros, média (μ) e o desvio padrão (σ). A função de densidade pode ser expressa por

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2\right] \quad (1)$$

Assim como para a distribuição Normal, os parâmetros da distribuição Log Normal também continuam sendo média e desvio padrão, no entanto, é preciso garantir que X > 0. A aplicação é geralmente em casos onde a variável é oriunda de um processo multiplicativo, como diluição por exemplo. (Stedinger, 1992). A função densidade de probabilidade Log Normal é expressa por:

$$f(x) = \frac{1}{x\sqrt{2\pi\sigma^2}} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln(x)-\mu}{\sigma}\right)^2\right] \; para\; x > 0 \quad (2)$$

onde x é normalmente distribuída com média (μ) e variância (σ^2).

A distribuição de Gumbel é a mais empregada na análise de variáveis hidrológicas, como por exemplo, no estudo de vazões de enchente (Naghettini e Pinto, 2007). Gumbel também se caracteriza por apresentar média e desvio padrão como parâmetros, no entanto, o coeficiente de assimetria é fixado em 1,1396. A distribuição de densidade de Gumbel é representada por:

$$fy(y) = \frac{1}{\alpha} \exp\left[-\frac{y-\beta}{\alpha} - \exp\left(-\frac{y-\beta}{\alpha}\right)^2\right] \quad (3)$$

$$\sigma^2 = \frac{\pi^2\alpha^2}{6} \quad (4)$$

$$\mu = \beta + 0{,}5772\alpha \quad (5)$$

onde α representa o parâmetro de escala e β parâmetro de posição.

O *United States. Geological Survey* (USGS), afirma que a distribuição Log Pearson Tipo 3 (LP3) é a distribuição estatística mais recomendada para o estudo de vazões extremas. A distribuição apresenta grande aplicabilidade devido ao bom ajuste aos dados medidos e a fácil utilização (McCuen, 1941).

A função densidade de probabilidade é expressa por:

$$fx(X) = |\beta|\{\beta[\ln(x) - \varepsilon]\}^{\alpha-1} \frac{\exp\{-\beta[\ln(x) - \varepsilon]\}}{x\Gamma(\alpha)} \quad (6)$$

onde α é o parâmetro de forma, β parâmetro de escala, ε parâmetro de posição e Γ(α) é a função Gamma .

Avaliação de desempenho das distribuições.

Além dos resultados do emprego das distribuições, é preciso avaliar a confiabilidade dos resultados obtidos. Neste trabalho o cálculo de *Bias* e Erro Padrão foi realizado por meio de um processo de validação chamado *Jackknife.* O conceito principal deste método de validação consiste em retirar um elemento da amostra por vez, de modo que para cada nova retirada seja aplicado o tratamento estatístico de interesse e posteriormente armazenando os resultados e realizando a comparação dos mesmos de modo a encontrar o *Bias* e o Erro Padrão do procedimento estatístico aplicado.

Neste estudo, o tratamento estatístico escolhido para avaliar o ajuste das distribuições aos dados observados foi o coeficiente de correlação entre os pontos observados e os pontos calculados por meio das distribuições. O coeficiente de correlação é descrito na equação 7,

$$\rho_{X,Y} = \frac{Cov(X,Y)}{\sigma_X \sigma_Y} = \frac{\sigma_{X,Y}}{\sigma_X \sigma_Y} \quad (7)$$

onde X e Y são variáveis, σ é a desvio padrão, e o coeficiente de correção, $\rho_{X,Y}$, varia de -1 a 1.

Assumindo uma amostra composta por n elementos e a probabilidade de interesse que se deseja calcular sendo T, o primeiro passo do *Jackknife*, consiste em retira uma observação da amostra, posteriormente calcula-se o valor da estatística desejada utilizando os pontos remanescentes da amostra, resultando em $T^{(i)}$. Repete-se o procedimento, deixando de fora uma observação de cada vez, até que todos os n elementos da amostra tenham sido retirados e calculados os respectivos $T^{(i)}$. As equações 7 e 8 representam respectivamente, *Bias* e Erro Padrão (Martinez e Martinez, 2002).

$$\widehat{SEjack}(T) = \left[\frac{n-1}{n}\sum_{i=1}^{n}\left(T^{(i)} - \overline{T^{(J)}}\right)^2\right]^{1/2} \quad (8)$$

$$\widehat{\text{Biasjack}}(T) = (n-1)(\overline{T^{(J)}} - T) \quad (9)$$

onde $\widehat{\text{Biasjack}}(T)$ é a estimativa de *Bias* utilizando *Jackknife*, n é o número de elementos da amostra, $\overline{T^{(J)}}$ é a média das repetições de T e $\widehat{\text{SEjack}}$(T) é a estimativa do erro padrão utilizando *Jackknife*.

RESULTADOS

Na análise inicial dos dados fluviométricos - visualização dos dados de vazões e cotas máximas, médias e mínimas anuais das estações, foi possível identificar que os municípios sofrem influência das barragens construídas para amortizar os efeitos das enchentes na bacia, principalmente influência do reservatório norte.

Ao realizar uma análise mais detalhada dos dados de máximas anuais, pode-se perceber que o município de Gaspar possui um vão de dados entre 1967-1984 e que os dados antes e depois dessa

falha, apresentam diferença significativa no comportamento da série de cotas em virtude das barragens. Portanto, na realização das análises de extremo, decidiu-se separar os dados de Gaspar em 2 blocos. Gaspar 1- referente aos dados de 1927 a 1966, e Gaspar 2 de 1985 a 2006.

O município de Blumenau apresentou redução das cotas máximas anuais principalmente após a construção da barragem Norte, localizada no município de José Boiteux. Ilhota, por possuir registro de dados a partir de 1988 – as barragem Sul e Oeste já estavam e a barragem Norte, maior barragem das 3 construídas, iniciou a operação em 1992, por esta razão, a influência na redução das cotas e vazões não é tão notória quanto em Blumenau e em Gaspar. No entanto, como o município encontra-se localizado a jusante dos municípios de Blumenau e Gaspar, pode-se inferir que Ilhota também sofreu influência na redução das cotas em virtude da amortização das ondas de cheia devido às barragens construídas a montante na bacia.

A aplicação das distribuições de extremo sob os dados fluviométricos dos municípios, pode ser observada na Figura 2, a qual apresenta os valores obtidos por meio do emprego das distribuições discutidas anteriormente.

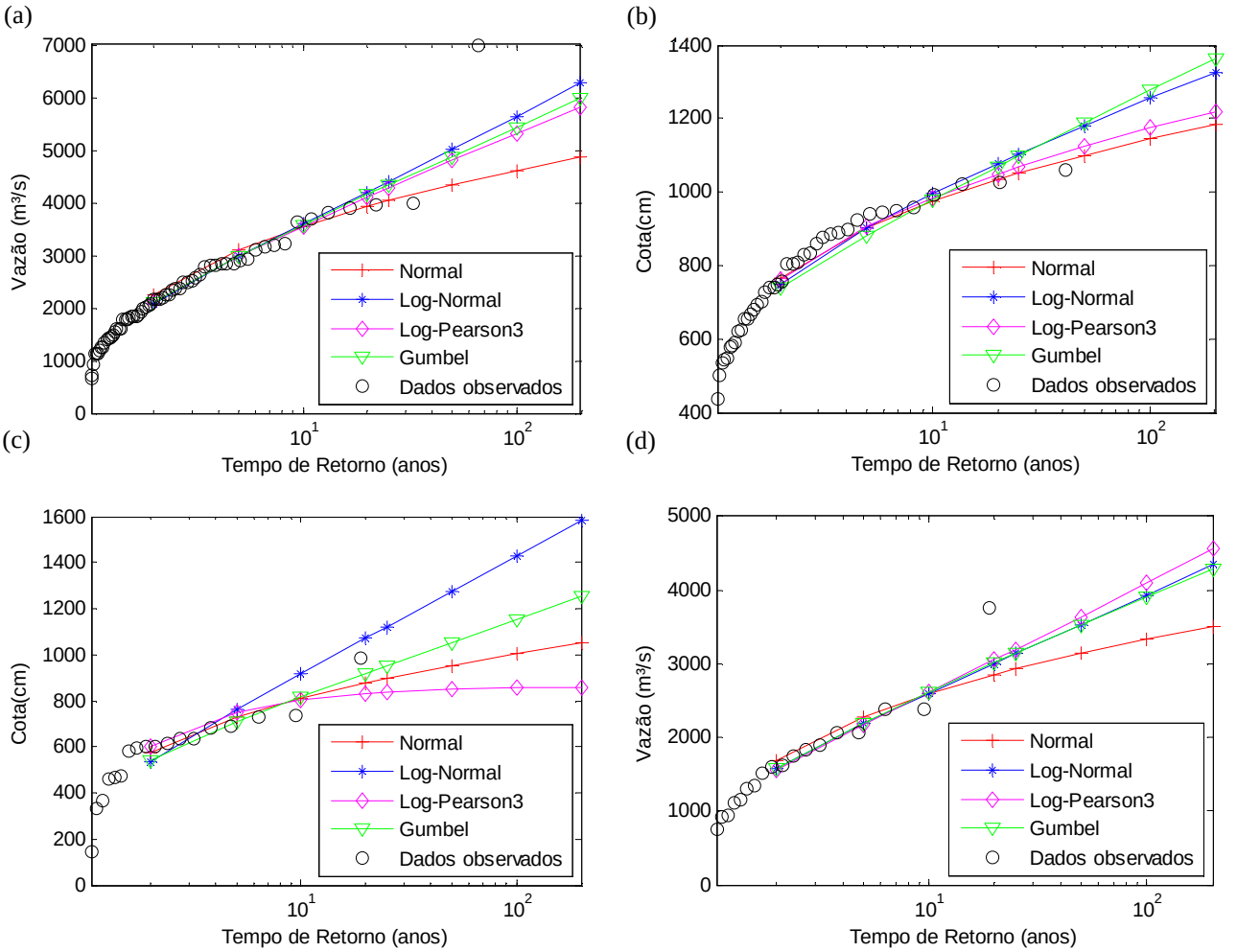


Figura 2 – Distribuições de Extremo aplicadas para os municípios de Blumenau(a), Gaspar 1(b), Gaspar 2 (c) e Ilhota (d).

Ao verificar a correlação dos dados medidos com os resultados das distribuições, pode-se observar por meio da Tabela 1 que os valores encontrados apontam para uma significativa correlação, pois os valores são bem próximos a 1.

Ao realizar a segunda etapa do *Jackknife* onde todos os $T^{(i)}$ são calculados, obtém-se um novo valor de correlação para cada amostra retirada – o qual é utilizado no procedimento do *Jackknife* para obter a média das correlações e posteriormente calcular o Erro Padrão e Bias.

A Figura 3 apresenta o conjunto desses valores $T^{(i)}$ de correlação, (diagramas de caixa) e os valores de correlação obtidos sem a retirada de nenhum elemento da amostra (representados por x). No diagrama de caixa, a caixa central é delimitada pelo primeiro quartil (Q_1) e o terceiro quartil (Q_3). A linha vermelha no interior da caixa representa a mediana, a haste superior se estende até Q_3 + 1,5*IQR* e a haste inferior até Q_1 - 1,5*IQR*. Os valores não compreendidos nos limites estabelecidos são considerados *outliers* (representados por +).

Tabela 1 - Valores do coeficiente de correlação entre os dados observados em relação aos dados calculados com as distribuições.

Distribuição	Cidade			
	Blumenau	Ilhota	Gaspar 1	Gaspar 2
Gumbel	0.9685	0.9687	0.9697	0.9375
Log-Normal	0.9711	0.9703	0.9837	0.9301
Normal	0.9330	0.9365	0.9941	0.9601
Log-Pearson 3	0.9675	0.9729	0.9929	0.9523

A Figura 3, os municípios Blumenau (a) e Ilhota (d) apresentaram resultados muito semelhantes nas distribuições Log Normal, Log Pearson 3 e Gumbel, assim como a dispersão observada nos dados foi pequena (inferior a 2%). Nota-se também que a distribuição Normal apresentou o menor coeficiente de correlação em ambas as cidades. Contudo, em uma análise mais detalhada, é possível perceber que quando removido o ponto mais extremo da série, tanto para Blumenau quanto para Ilhota, o coeficiente de correlação apresentou valores muito próximos de 1, fato esse que também foi verificado para as outras distribuições aplicadas a Blumenau.

No caso do município de Gaspar, representado por Gaspar 1(1927-1966) e Gaspar 2 (1985-2006) os coeficientes de correlação encontrados foram distintos, o que aponta para a diferença significativa nos dados, motivo pelo qual a série foi desmembrada mesmo os dados sendo oriundos da mesma estação. Outro fator que corrobora para o fato de Gaspar 2 não apresentar valores próximos aos obtidos em Gaspar 1, é a diferença no tamanho da série de dados, em Gaspar 1 tem-se aproximadamente 21 anos de registro de dados de cota e em Gaspar 2 tem-se 39 anos de registros. Aliado a esses fatores, também tem o fato de que o período de sem registro dos dados coincide com a construção de 2 das 3 barragens na bacia, sendo que a terceira barragem foi concluída poucos anos após a retomada das medições de cota.

Visando avaliar a qualidade do ajuste das distribuições de extremo empregadas aos dados observados, procedeu-se o cálculo do Erro Padrão e de Bias através do método *Jackknife* como explicado anteriormente. Os coeficientes de correlação entre os dados históricos e os resultados das distribuições apresentaram boa precisão.

A Tabela 2 demonstra que o Erro Padrão calculado com *Jackknife* apresentou valores baixos, onde a maior parte dos valores calculados foi inferior a 3 % e o maior erro encontrado foi de 7% para distribuição Log Normal na série de dados Gaspar 2. Os valores referentes ao cálculo de Bias também foram baixos, demonstrando assim que os coeficientes correlação entre os dados históricos e os resultados das distribuições apresentaram boa precisão.

Tabela 2 – Valores de Erro Padrão e Bias para cada uma das distribuições aplicadas para cada uma das cidades.

Distribuição	Erro Padrão				Bias			
	Blumenau	Ilhota	Gaspar 1	Gaspar 2	Blumenau	Ilhota	Gaspar 1	Gaspar 2
Gumbel	0.0227	0.0213	0.0159	0.0638	-0.0095	-0.0148	0.0004	-0.0257
Log-Normal	0.0173	0.0216	0.0116	0.0696	-0.0104	-0.0116	-0.0043	-0.0294
Normal	0.0542	0.0535	0.0013	0.0119	-0.0219	0.0409	0.0002	0.0037
Log-Pearson 3	0.0239	0.0147	0.0063	0.0333	-0.0086	-0.0210	-0.0074	-0.0145

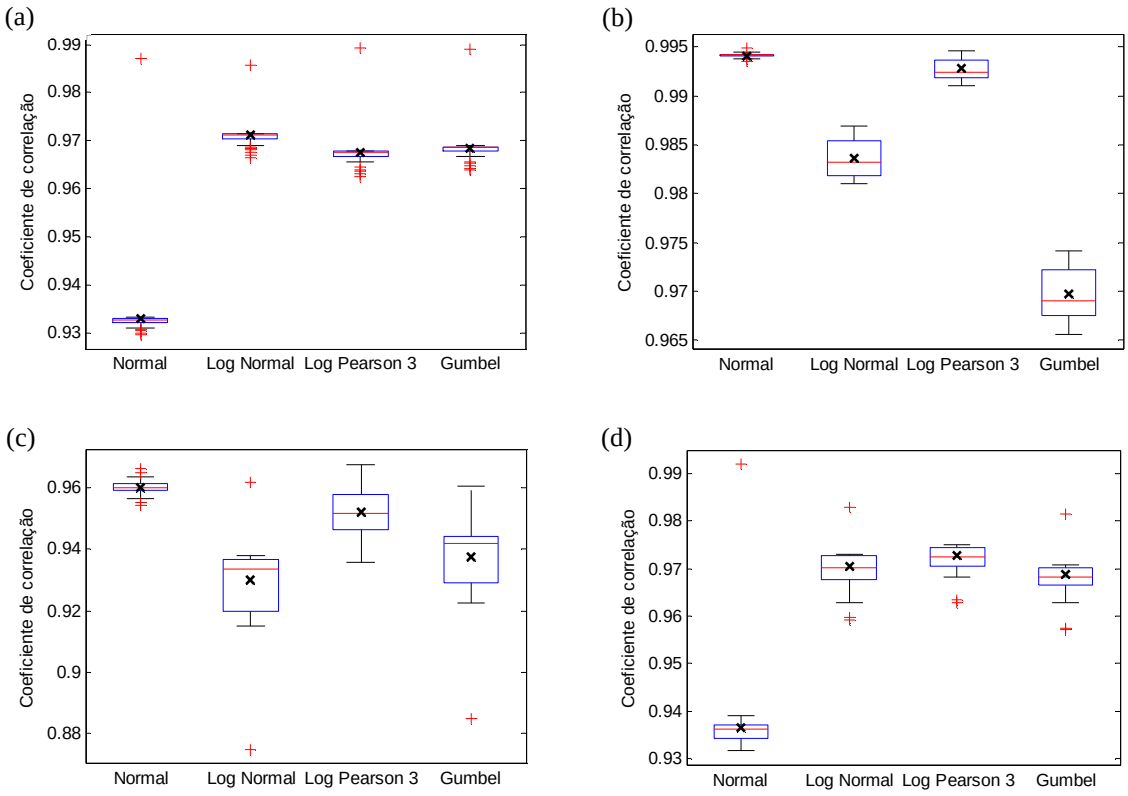


Figura 3 – Apresenta o conjunto de valores obtidos com *Jackknife*, (diagramas de caixa) e os valores de correlação obtidos sem *Jackknife* (representados por x) aplicadas para os municípios de Blumenau (a), Gaspar 1(b), Gaspar 2 (c) e Ilhota (d). No diagrama de caixa, a caixa central é delimitada pelo primeiro quartil (Q_1) e o terceiro quartil (Q_3), onde $IQR = Q_3 - Q_1$. A linha vermelha no interior da caixa representa a mediana, a haste superior se estende até $Q_3 + 1{,}5IQR$ e a haste inferior até $Q_1 - 1{,}5IQR$. Os valores não compreendidos nos limites estabelecidos são considerados *outliers* (representados por +).

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Pode-se observar que as distribuições de extremo para os municípios de Blumenau, Gaspar e Ilhota, apresentaram valores de correlação muito próximos uns dos outros e quando calculado o Erro Padrão e o *Bias* pode-se perceber que todas as distribuições estudadas apresentaram valores virtualmente iguais.

As obras hidráulicas realizadas na bacia influenciaram no regime de cotas do rio. Um dos exemplos é a distinção dos resultados obtidos quando comparado Gaspar 1 e Gaspar 2. O vão de dados entre 1966-1985 é justamente no período de construção das barragens Sul e o Oeste.

Outro aspecto interessante a ser observado é que quando removido o evento mais extremo da série de máximas anuais, a distribuição que no geral apresentava menor correlação, passa a assumir

o maior valor de correlação encontrado. Esse fenômeno pode ser observado no município de Blumenau, onde a distribuição Normal manteve-se entre 0.93 a 0.94, exceto quando removido o valor mais extremo da série, obtendo-se 0.99 de correlação. O mesmo aconteceu para o município de Ilhota. Portanto, é possível que uma série de dados possa ser composta de um conjunto de distribuições e que principalmente os eventos mais extremos sejam justamente os mais complicados de representar.

REFERÊNCIAS

FRANK, B.; PINHEIRO, A.(2003). Enchentes na Bacia do Rio Itajaí: 20 anos de experiências. Org. por Frank, B. e Pinheiro, A, FURB. Ed: Edifurb, Blumenau – SC pp. 237.

MARCELINO, E. V.;GOERL, R. F.; PARIZOTO, D. G. V.; OLIVEIRA, C. A. F.; MURARA, P. G. (2014) Inundação Brusca. In: Atlas de desastres naturais do estado de Santa Catarina: Período de 1980 a 2010. Org. por Herrmann., UFSC, Florianópolis-SC, pp. 123.

MARTINEZ. W.L., MARTINEZ. A.R.(2002). Data Partitioning. In Computational Statiscs Handbook with MATLAB®, Org. por Martinez e Martinez. Ed. Chapman & Hall/CRC, Washington, D.C., pp 243- 269

MCCUEN. R. H. (1941). Modeling hydrologic change: statistical methods. Department of Civil and Environmental Engineering University of Maryland, College Park – MD, 450p.

NAGHETTINI, M.; PINTO, É. J. de A. In Hidrologia Estatística. Org. por Naghettini e Pinto. CPRM, ed. CPRM, Belo Horizonte, pp. 127.

NODOLF, J. M.; SMITH, J. B.; MOORE, D. L; FULLERTON, W. T. (2008). Innundation Mapping of Dam Breach Conditions. In *World Environmental & Water Resources Congress*, Honolulu, Mai. 2008

REFOSCO, J. C.; SILVA, G. S.; ESKELSEN, C. R.; NICOLETTI, A. L.; CORDERO, A.; SALVADOR, D. F. (2013). Mapas de inundação a partir de geoprocessamento e georreferenciamento – o caso de Blumenau (SC). In *Anais XVI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*, Foz do Iguaçu, Abr. 2013 pp. 4594-4600.

SAVAGE, J.; BATES, P.; FREER, J.; NEAL, J.; ARONICA, G. (2014). The impact of Scale on Probabilistic Flood Inundation Maps Using a 2D Hydraulic Model with Uncertain Boundary Conditions. In *Proceedings of the Second International Conference on Vulnerability, Uncertainty and Risk Analysis and Management (ICVRAM)*, Liverpool, Jul. 2014, pp. 279-289.

STEDINGER, J.R.; VOGEL, R. M.; FOUFOULA G., Efi.(1992) Hidrologic Analysis and Interpretation. In: Handbook of hydrology. **:** Frequency analysis of extreme events. Org. por Maidment. United States Of America., ed.: R. R. Donnelley & Sons Company, pp. 181-182.

TUNG, Y.(2002) Keynote leture: Risk-Based design of flood defense system. In Proceedings of Second International Symposium of Flood Defense, Beijing, 2002. p. 71-81.