

DISTRIBUIÇÃO GENERALIZADA DE VALORES EXTREMOS NO ESTUDO DE DADOS CLIMÁTICOS: UMA BREVE REVISÃO E APLICAÇÃO

Luiz Alberto Beijo¹, Fabricio Goecking Avelar¹

Resumo: *O aumento da frequência de fenômenos climáticos extremos tem tornado a teoria de valores extremos cada vez mais relevante nos planejamentos governamentais e da população em geral. Diante desses fatos, objetivou-se neste trabalho apresentar uma breve revisão sobre a utilização da distribuição generalizada de valores extremos em dados ambientais e exemplificar sua aplicação com enfoque clássico e bayesiano no estudo de precipitação máxima, ajustando-a aos dados de Carbonita-MG. Os resultados mostraram que a distribuição GEV é de suma importância para a modelagem de dados climáticos extremos e modela de forma adequada os dados de precipitações máximas para a região em estudo.*

Palavras-chave: tempo de retorno, precipitação máxima, estimador bayesiano, estimador de máxima verossimilhança.

Introdução

Atualmente uma das grandes preocupações da humanidade é em relação ao aquecimento global e suas consequências para a vida no planeta. Um de seus efeitos mais visíveis é o aumento da ocorrência e da amplitude de eventos extremos como, por exemplo, chuvas torrenciais seguidas de grandes períodos de estiagem e aumentos e quedas bruscas da temperatura. Esses fatores devem ser levados em consideração no planejamento de construções e de atividades relacionadas à gestão e saúde, por exemplo. Neste contexto, a previsão do comportamento destes fenômenos extremos torna-se de suma importância para governos e populações em geral, tornando o estudo da teoria de valores extremos cada dia mais imprescindível em estudos de variáveis ambientais.

Uma metodologia utilizada para descrever o comportamento das observações extremas, ou seja, dos pontos mais afastados da média, é a teoria de valores extremos, que tem sido de vital importância para o planejamento de atividades sujeitas aos efeitos de eventos com essas características.

Em 1955 Jenkinson ([16]) propôs que os três tipos de distribuições de valores extremos (Gumbel, Fréchet e Weibull) poderiam ser representados numa forma paramétrica única, denominada *distribuição generalizada de valores extremos* (GEV, do inglês “*Generalized Extreme Value*”), que tem função de distribuição acumulada dada pela seguinte expressão:

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

definida em, $-\infty < x < \mu - \frac{\sigma}{\xi}$ para $\xi < 0$, $\mu - \frac{\sigma}{\xi} < x < \infty$ para $\xi > 0$ e, $-\infty < x < \infty$ quando $\xi \rightarrow 0$. Sendo μ , σ e ξ os parâmetros de posição, escala e de forma respectivamente, com $\sigma > 0$.

¹Instituto de Ciências Exatas - ICEx, Unifal-MG,
luiz.beijo@unifal-mg.edu.br, fabricio@unifal-mg.edu.br

Na Figura 1 são apresentados os gráficos da função densidade de probabilidade da distribuição GEV. Pode-se observar que o parâmetro ξ determina a natureza das caudas da distribuição.

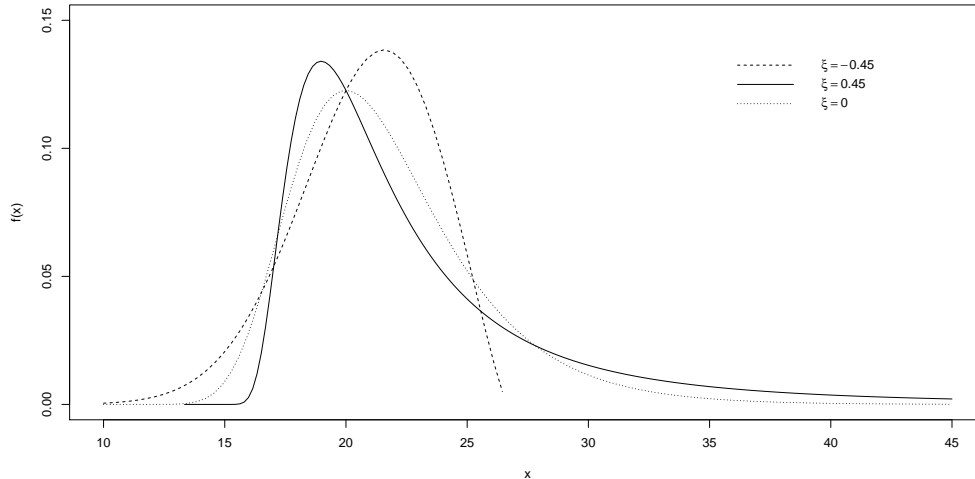


Figura 1: Função densidade de probabilidade da distribuição generalizada de valores extremos (GEV) com $\mu = 20$, $\sigma = 3$, para $\xi = -0.45$ (Weibull), $\xi = 0.45$ (Fréchet) e $\xi = 0$ (Gumbel)

Segundo Coles e Pericchi (2003) ([8]), a redução da distribuição GEV para a distribuição Gumbel deve ser feita com cautela mesmo quando testes padrões a indicam, pois a distribuição GEV estima melhor os quantis extremos.

A partir do trabalho de Jenkinson (1955) ([16]), várias aplicações desta teoria têm sido implementadas com sucesso em muitas áreas da ciência como, Hidrologia, Climatologia, Ciências Atuariais, Engenharia e em Economia e Finanças, nas quais o interesse maior está na obtenção de quantis extremos desta distribuição. Muitas organizações vinculadas à segurança de barragens recomendam explicitamente o estudo de precipitações máximas para o caso de grandes obras, nas quais o galgamento envolve grandes riscos (Tucci, 2001) ([29]).

Em estudos de fenômenos ambientais, a distribuição GEV é utilizada principalmente no planejamento como a finalidade de evitar problemas relacionados à várias áreas de Engenharia. Neste âmbito, as variáveis mais estudadas são velocidade máxima de ventos, temperaturas máximas e mínimas e precipitações máximas. Como exemplo, dentre várias aplicações, podemos citar Hosking et al. (1985), Chowdhury et al. (1991), Queiroz et al. (2010) ([13],[6],[20]), que utilizaram a distribuição GEV para estudar frequências regionais de vazões; Bautista (2002), Van den Brink et al. (2004) e Hundedcha et al. (2008) ([1],[30],[15]) que a utilizaram em estudos sobre velocidade máxima de ventos. Em estudos de temperaturas extremas podemos citar Nogaj et al. (2006), Brown et al. (2008), Rusticucci e Tencer (2008) ([18],[5],[28]). Na análise de dados de precipitações máximas, Gomes et al. (1989), Coles e Pericchi (2003), Feng et al. (2007), Beijo et al. (2009) ([8],[14],[3]).

Cox et al. (2002) ([10]) discutiram alguns aspectos estatísticos e probabilísticos da teoria de valores extremos relacionados às chuvas torrenciais e inundações. Os autores fizeram uma revisão dos principais trabalhos apresentados em literatura, destacaram a necessidade de obterem-se estimativas mais precisas e confiáveis destes eventos e concluíram que para isto são necessários modelos que levem em consideração o máximo de informação possível, como efeitos de tendência, dispersão e dependência temporal e espacial.

Segundo Coles e Dixon (1999) ([7]), a partir dos valores extremos de amostras, vários métodos podem ser utilizados para obtenção dos estimadores dos parâmetros da distribuição GEV. Inúmeras sugestões foram propostas, entre elas, técnicas gráficas, estimadores baseados no método dos momentos, métodos de estatísticas de ordem, método dos momentos de probabilidade ponderada, método de máxima verossimilhança, método de máxima verossimilhança penalizada e métodos Bayesianos, dentre os quais, o mais aplicado tem sido o método da máxima

verossimilhança. Porém os autores comentam que um argumento que tem sido usado contra os estimadores de máxima verossimilhança se refere às suas propriedades em pequenas amostras.

A aplicação da Inferência Bayesiana em modelagem de valores extremos passou a ser significativa a partir de meados da década de 90. Conforme Coles e Powell (1996) ([9]), até o ano de 1995, havia poucos trabalhos ligando os dois temas e os que existiam, eram em sua maioria, aplicados à distribuição Weibull em estudos de análise de confiabilidade e com prioris não informativas. Entre estes podem ser citados: Holla (1966) e Sinha e Sloan (1988) ([12],[23]). Posteriormente, trabalhos nesta mesma linha, porém com prioris informativas, foram implementados com destaque para Smith e Naylor (1987), Singpurwalla e Song (1988) e Berger e Sun (1993) ([25],[22],[4]).

Frequentemente, em análises de precipitações máximas, são disponíveis pequenas séries de dados. Logo, faz-se necessário a aplicação de uma metodologia que possibilite a otimização do uso dos dados disponíveis. De acordo com Paulino et al. (2003) e Behrens et al. (2004), ([19],[2]) uma das vantagens da Inferência Bayesiana está no fato de permitir a incorporação informações passadas (*a priori*) melhorando o processo de inferência.

Sendo assim, neste trabalho é apresentado uma aplicação da distribuição GEV com a utilização dos estimadores de máxima verossimilhança e da abordagem bayesiana proposta por Beijo et al. (2009) ([3]) nos dados de precipitação máxima de Carbonita-MG.

Metodologia

A função de densidade da distribuição GEV é dada por:

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

definida em, $-\infty < x < \mu - \frac{\sigma}{\xi}$ para $\xi < 0$, $\mu - \frac{\sigma}{\xi} < x < \infty$ para $\xi > 0$ e, $-\infty < x < \infty$ quando $\xi \rightarrow 0$.

Supondo que há independência entre as observações, a função de verossimilhança é expressa por

$$L(\mathbf{x}|\theta) = \frac{1}{\sigma^n} \prod_{i=1}^n \left\{ \left[1 + \xi \left(\frac{x_i - \mu}{\sigma} \right) \right]^{-\left(\frac{1+\xi}{\xi}\right)} \right\} \exp \left\{ \sum_{i=1}^n \left\{ - \left[1 + \xi \left(\frac{x_i - \mu}{\sigma} \right) \right]^{-\left(\frac{1}{\xi}\right)} \right\} \right\}. \quad (3)$$

O evento máximo provável para um determinado tempo de retorno T pode ser determinada pela seguinte expressão, que corresponde ao quantil da distribuição GEV:

$$y_i = q_p = \mu + \frac{\sigma}{\xi} \left[(x_p)^{-\xi} - 1 \right], \quad (4)$$

em que $x_p = -\ln(i - p)$.

Adotando os quantis como forma de incorporar o conhecimento a priori, Beijo et al. (2009) ([3]) desenvolveram uma distribuição a priori a partir da expressão (4), na qual os autores expressaram a informação *a priori* em termos de (q_{p1}, q_{p2}, q_{p3}) , com $p_1 > p_2 > p_3$ e, conseqüentemente, $q_{p1} < q_{p2} < q_{p3}$. Assumindo que a priori desses quantis são independentes, os autores admitiram como priori marginal a distribuição Gumbel com os parâmetros a_i (posição) e b_i (escala) e justificaram esta construção no fato de estar trabalhando com valores extremos, pois, $q_{p1} < q_{p2} < q_{p3}$ devem ser altos quantis, podendo, portanto serem considerados valores extremos. Logo, a distribuição dos quantis deve corresponder a uma distribuição de valores extremos, como é o caso da Gumbel.

Assim, a distribuição *a priori* para $\theta = (\mu, \sigma, \xi)$, estabelecida por Beijo et al. (2009) ([3]), pode ser expressa por

$$P(\theta) \propto J(\theta) \prod_{i=1}^3 \frac{1}{b_i} \exp \left\{ - \left(\frac{q_{pi} - a_i}{b_i} \right) - \exp \left(- \frac{q_{pi} - a_i}{b_i} \right) \right\}, \quad (5)$$

em que $J(\theta)$ é o Jacobiano da transformação de (q_{p1}, q_{p2}, q_{p3}) para $\theta = (\mu, \sigma, \xi)$, dado por

$$J(\theta) = \frac{\sigma}{\xi^2} \left| \sum_{i=1}^3 \sum_{j=i+1}^3 (-1)^{i+j} (x_i x_j)^{-\xi} \ln \left(\frac{x_j}{x_i} \right) \right|, \quad (6)$$

em que $x_i = \ln(1 - p_i)$, para $i = 1, 2, 3$.

Dada a densidade *a priori* e a função de verossimilhança, pode-se então determinar a densidade *a posteriori* dada por:

$$P(\theta|\mathbf{x}) \propto J(\theta) \prod_{j=1}^3 \frac{1}{b_j} \exp \left[- \left(\frac{q_j - a_j}{b_j} \right) - \exp \left(- \frac{q_j - a_j}{b_j} \right) \right] \quad (7)$$

$$\times \frac{1}{\sigma^n} \prod_{i=1}^n \left\{ \left[1 + \xi \left(\frac{x_i - \mu}{\sigma} \right) \right]^{-\left(\frac{1+\xi}{\xi}\right)} \right\} \exp \left\{ \sum_{i=1}^n \left\{ - \left[1 + \xi \left(\frac{x_i - \mu}{\sigma} \right) \right]^{-\frac{1}{\xi}} \right\} \right\}$$

A integral da expressão 7 não possui forma analítica. A técnica Monte Carlo via Cadeias de Markov (MCMC) foi empregada para superar esta dificuldade. O algoritmo utilizado foi de Metrópolis, que está implementado no pacote MCMCpack ([17]) do Sistema Computacional Estatístico R (2011) ([21]). Foram realizadas 420000 iterações, descartadas as 20000 primeiras (“burn-in”) e, para assegurar a independência da amostra, considerou-se um espaçamento de tamanho 100 (“thin”), obtendo uma amostra de tamanho 4000 para cada parâmetro. Para verificar a convergência das cadeias foram utilizados os pacotes boa (Bayesian Output Analysis) e evdbayes ([24],[26]) e na obtenção das estimativas de máxima verossimilhança foi utilizado o pacote evd ([27]). Todos esses pacotes também são do Sistema Computacional Estatístico R ([21])

Como aplicação da distribuição GEV foram utilizados os dados de precipitação máxima diárias, da série histórica de 1962-2002 obtidos a partir dos registros agrometeorológicos da Estação de Carbonita, no estado de Minas Gerais. Carbonita está situada no Vale do Jequitinhonha e sua altitude é de 672 m acima do nível do mar. A precipitação pluviométrica anual média é de 1.062 mm. Foram analisados os dados dos meses de novembro, dezembro e do período anual. Aplicou-se as observações de 1962 a 1992 para estimar a precipitação máxima provável para os tempos de retorno de 10 e 20 anos e extraiu-se a maior observação do período restante (1993 a 2002), para verificar a acurácia das estimativas pontuais e intervalares fornecidas pelos métodos da máxima verossimilhança e bayesiano.

Resultados e Discussão

A convergência da cadeia de cada parâmetro foi monitorada por meio da visualização gráfica do traço, densidade e dos critérios disponíveis no pacote BOA do programa R, não existindo evidências contra a convergência. A taxa de aceitação, que ficou entre 0,25 e 0,46, permanecendo dentro da faixa recomendada em literatura.

Na Tabela 1 é apresentada a maior precipitação pluvial em mm ocorrida nos meses de novembro e dezembro e no ano, entre 1993 e 2002 em Carbonita-MG.

novembro	dezembro	Ano
96,6	98,8	107,4

Tabela 1: Maior precipitação pluvial (mm), ocorrida nos meses de novembro e dezembro e no ano, entre 1993 e 2002 em Carbonita-MG

Na Tabela 2 são apresentadas as estimativas das precipitações pluviárias máximas, em mm, nos meses de novembro e dezembro e no ano em Carbonita - MG, para os tempos de retorno de 10 e 20 anos via método da máxima verossimilhança e via inferência bayesiana. Também são apresentados os intervalos de 95% de confiança e HPD de 95%.

Método	Período	10 anos		20 anos	
		\hat{y}_p	Intervalo (95%)	\hat{y}_p	Intervalo (95%)
Máxima Verossimilhança	novembro	65,2	[45,7; 84,8]	79,2	[47,7; 110,6]
	dezembro	76,2	[59,6; 92,9]	87,2	[62,8; 111,5]
	ano	91,1	[82,6; 99,7]	96,6	[87,3; 105,9]
Bayesiano	novembro	105,4	[89,4; 122,3]	136,3	[114,1; 162,9]
	dezembro	102,8	[86,8; 121,2]	135,1	[110,9; 158,5]
	ano	115,1	[99,6; 134,5]	144,1	[123,8; 172,3]

Tabela 2: Estimativas das precipitações pluviárias máximas (mm) nos meses de novembro e dezembro e no ano em Carbonita - MG, para os tempos de retorno de 10 e 20 anos e seus respectivos intervalos de confiança e HPD de 95% obtidos via método da máxima verossimilhança e via inferência bayesiana, respectivamente.

A partir das Tabelas 1 e 2 é possível verificar que a estimativa pontual da precipitação máxima (\hat{y}_p) encontrada por meio do método da máxima verossimilhança e seu respectivo limite superior do intervalo de confiança de 95%, para um tempo de retorno de 10 anos, são menores que as maiores precipitações ocorridas nos meses de novembro e dezembro entre os anos de 1993 e 2002 e também para o período anual. Portanto conclui-se que houve uma subestimação da quantidade máxima provável de precipitação. Para os meses de novembro e dezembro, a precipitação máxima é atingida ao adotar como referência o limite superior do intervalo de confiança do período de retorno de 20 anos. Já as estimativas pontuais da precipitação máxima (\hat{y}_p) obtidas via inferência bayesiana para o período de retorno de 10 anos são próximas das maiores precipitações ocorridas em todos os casos estudados. Os valores das maiores precipitações ocorridas estão contidos no interior dos intervalos HPD de 95%. A metodologia bayesiana, portanto, apresentou resultados mais acurados na estimação das precipitações pluviárias máximas nos meses de novembro e dezembro e no ano em Carbonita-MG, apresentando-se como uma boa alternativa na incorporação de conhecimentos *a priori* no estudo de dados extremos. Resultados semelhantes foram obtidos por Coles & Powell (1996) ([9]) cujas estimativas bayesianas dos parâmetros da distribuição GEV foram melhores do que as estimativas fornecidas pela máxima verossimilhança em dados de precipitação máxima para certos períodos de retorno. Eles destacaram ainda que a estimação bayesiana oferece resultados mais confiáveis do que os da máxima verossimilhança.

Do ponto de vista prático a maior acurácia obtida na estimação via metodologia bayesiana é muito importante em termos de segurança e economia. Planejamentos feitos a partir de dados extremos exigem maior acurácia para, por exemplo, evitar sérios danos em uma curva de nível, um dique ou uma represa, que não suportariam o volume de água causado por uma precipitação pluvial maior do que estava previsto em um menor período de tempo. Na construção de diques e represas a subestimação da precipitação pluvial máxima pode causar rompimentos dessas estruturas ocasionando possivelmente, além dos prejuízos financeiros, a perda de vidas.

Conclusão

A distribuição generalizada de valores extremos é de suma importância para a modelagem de dados climáticos extremos e mostrou-se adequada para a obtenção das estimativas de precipitações máximas em Carbonita-MG, sendo que a metodologia Bayesiana, com a distribuição *a priori* desenvolvida por Beijo et al. (2009) ([3]), apresentou resultados mais acurados.

Referências

- [1] BAUTISTA, E. A. *A distribuição generalizada de valores extremos no estudo da velocidade máxima do vento em Piracicaba, SP.*, Tese de Doutorado, ESALQ/USP, 2002.
- [2] BEHRENS, C. N.; LOPES, H. F.; GAMERMAN, D. Bayesian analysis of extreme events with threshold estimation. *Statistical modeling*, v. 4, n. 3, p. 227-244, 2004.
- [3] BEIJO, L. A.; VIVANCO, M. J. F.; MUNIZ, J. A. Análise bayesiana no estudo do tempo de retorno das precipitações pluviométricas máximas em Jaboticabal (SP). *Ciência e Agrotecnologia*, v. 33, n. 1, p. 261-270, 2009.
- [4] BERGER, J. O.; SUN, D. Bayesian analysis for the poly-Weibull distribution. *J. Amer. Statist. Assoc.*, v. 88, p. 1412-1418, 1993.
- [5] BROWN, S. J.; CAESAR J.; FERRO, C. A. T. Global changes in extreme daily temperature since 1950. *Journal of Geophysical Research*, v. 113, D05115, 2008.
- [6] CHOWDHURY, J. U.; STENDINGER, J. R.; LU, L. H. Goodness of fit test for regional generalized extreme value flood distributions. *Water Resources Research*, v. 27, n. 7, p. 1765-1776, 1991.
- [7] COLES, S. G.; DIXON, J. Likelihood-based inference for extreme values models. *Extremes*, Tyresoe, v. 2, n. 1, p. 5-23, 1999.
- [8] COLES, S. G.; PERICCHI, L. R. Anticipating catastrophes through extreme value modelling. *Applied Statistics*, v. 52, n. 3, p. 405-416, 2003.
- [9] COLES, S. G.; POWELL, E. A. Bayesian methods in extreme value modelling: a review and new developments. *International Statistics Review*, Voorburg, v. 64, n. 1, p. 119-136, 1996.
- [10] COX, D. R.; ISHAM, V. S.; NORTHROP, P. J. Floods: some probabilistic and statistical approaches. *Philosophical Transactions: Mathematical, Physical and Engineering Sciences A.*, v. 360, p. 1389-1408, 2002.
- [11] GOMES, F. G.; AQUINO, L. H.; OLIVEIRA, M. S. Estudo da distribuição e frequência de precipitação pluviométrica máxima em períodos de dez e quinze dias, um mês e um ano, em Lavras (MG) pela distribuição Gumbel. *Ciência e Prática*, v. 13, n. 2, p. 177-184, 1989.
- [12] HOLLA, M. S. Bayesian estimates of reliability function. *Australian J. Statistics*, v. 8, p. 32-35, 1966.
- [13] HOSKING, J. R. M.; WALLIS, J. R.; WOOD, E. F. An appraisal of the regional flood frequency procedure in the UK flood studies report. *Hydrological Science Journal*, v. 30, n. 1, p. 85-109, 1985.

- [14] FENG, S.; NADARAJAH, S.; HU, Q. Modeling annual extreme precipitation in China using the generalized extreme value distribution. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, v. 85, n. 5, p.599-613, 2007.
- [15] HUNDECHA, Y.; ST-HILAIRE, A.; OUARDA, T. B. M. J.; EL ADLOUNI, S.; GANCHON, P. A nonstationary extreme value analysis for the assessment of changes in extreme annual wind speed over the Gulf of St. Lawrence, Canada. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, v. 47, p. 2745-2759. 2008.
- [16] JENKINSON, A. F. The frequency distribution of the annual maximum (or minimum) values of meteorological elements. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, Reading, v. 81, n. 348, p. 158-171, 1955.
- [17] MARTIN, A. D.; QUINN, K. M.; PARK, J. H. MCMCpack: Markov Chain Monte Carlo in R. *Journal of Statistical Software*, v. 42, n. 9, p. 1-21.
- [18] NOGAJ, M.; YIOU, P.; PAREY, S.; MALEK, F.; NAVEAU, P. Amplitude and frequency of temperature extremes over the North Atlantic region. *Geophysical Research Letters*, v. 33, n. 10, 2006.
- [19] PAULINO, D. C.; TURKMAN, M. A. A; MURTEIRA, B. *Estatística bayesiana*. Lisboa:FCG, 2003. 446 p.
- [20] QUEIROZ, M. M. F; SAMPAIO, S. C.; GOMES, B. M.; IOST, C. Estudo de vazões mínimas $Q_{1,10}$ e $Q_{7,10}$ de rios do Paraná segundo distribuição Generalizada. *Revista Verde*, v. 5, n. 3, p. 32-46, 2010.
- [21] R DEVELOPMENT CORE TEAM. *R: A language and environment for statistical computing*. R Foundation for Statistical Computing, Viena, Austria, 2011. Disponível em <http://www.R-project.org>. Acesso em 07 de maio de 2011.
- [22] SINGPURWALLA, N. D.; SONG, M. S. Reliability analysis using Weibull lifetime data and expert opinion. *IEEE Trans. Reliab.*, v. 37, p. 340-347, 1988.
- [23] SINHA, S. K.; SLOAN, J. B. Bayes estimation of the parameters and reliability function of 3-parameter Weibull distribution . *IEEE Trans. Reliability*, v. 37, p. 364-368, 1988.
- [24] SMITH, B. J. boa: an R package for MCMC output convergence assessment and posterior inference. *Journal of Statistical Software*, v. 21, n. 11, p. 1-37, 2007.
- [25] SMITH, R. L.; NAYLOR, J. C. A comparison of maximum likelihood and bayesian estimators for three parameter Weibull distribution. *Applied Statistics*, v.36, p. 358-369, 1987.
- [26] STEPHENSON, A.; RIBATET, M. *evdbayes: Bayesian Analysis in Extreme Value Theory*. R package versão 1.0-8. Disponível em <http://www.R-project.org/package=evdbayes>. Acesso em 07 de maio de 2011.
- [27] STEPHENSON, A. G. Extreme Value Distributions. *R News*, v. 2, n. 2, p. 31-32, 2002.
- [28] RUSTICUCCI, M.; TENCER, B. Observed changes in return values of annual temperature extremes over Argentina. *Journal of Climate*, v. 21, p. 5455-5467, 2008.
- [29] TUCCI, C. M. *Hidrologia: ciência e aplicação*. Porto Alegre: UFRGS, 2001. 943 p.
- [30] VAN DEN BRINK, H.W.; KONEN, G.P.; OPSTEEGH, J. D. Statistics of extreme synoptic-scale wind speeds in ensemble simulations of current and future climate. *Journal of Climate*, v. 17, p. 4564-4574, 2004.