

ANÁLISE DA CARACTERIZAÇÃO DE EVENTOS HIDROLÓGICOS EXTREMOS PARA A REGIÃO DE SÃO CARLOS - SP

André S. Ballarin¹; Edson C. Wendland² & Jamil A. A. Anache²

RESUMO – O presente trabalho buscou avaliar uma metodologia de caracterização de eventos extremos de máxima precipitação que considera, em sua análise, a variabilidade espacial dos dados de precipitação e o ranqueamento do desempenho dos modelos de probabilidade em diferentes testes descritivos. O estudo foi conduzido na região de São Carlos, avaliando 11 estações pluviométricas. Foram utilizados 6 modelos de probabilidade usualmente aplicados na hidrologia. A partir da seleção dos melhores modelos de probabilidade para cada uma das estações, comparou-se os quantis de precipitação associados a diferentes períodos de retorno estimados com os valores estipulados pelo Departamento de Água e Energia Elétrica - DAEE, calculados a partir dos dados de uma única estação. Os resultados confirmaram a necessidade de se considerar a variabilidade espacial no processo de caracterização de eventos extremos. A heterogeneidade dos resultados encontrados impossibilita a adoção de um modelo único para a região, evidenciando a importância da comparação de diferentes distribuições de probabilidade na etapa de caracterização de eventos extremos.

Palavras-chaves: hidrologia; precipitação; eventos extremos

ABSTRACT – This work presents a methodology to characterize maximum rainfall events considering, in its analysis, the precipitation's spatial variability and the ranking of the probability models' performance in different descriptive tests. The study was carried out in the region of São Carlos, using data of 11 raingages. It was analysed 6 different probability models commonly applied in hydrology. From the selection of the best probability model for each raingage, it was estimated the precipitation quantis, associated with different return periods, and compared it with the values stipulated by the Departamento de Água e Energia Elétrica - DAEE, using data of a single raingage. The results confirmed the need to consider the spatial variability in the characterization process of extreme events. The heterogeneity of the results makes it impossible to adopt a single model for the region, evidencing the importance of comparing different probability distributions in the characterization stage of extreme events.

Palavras-Chave – hydrology; precipitation; extreme events

1) MSc Student: Department of Hydraulics and Sanitation, São Carlos School of Engineering (EESC), University of São Paulo (USP), CxP. 359, São Carlos-SP, 13566-590. Contact: 14 99604 2031, andre.ballarin@usp.br.

2) Professor: Department of Hydraulics and Sanitation, São Carlos School of Engineering (EESC), University of São Paulo (USP), CxP. 359, São Carlos-SP, 13566-590. Contact: ew@sc.usp.br; jamil.anache@usp.br.

1. INTRODUÇÃO

O ser humano sempre apresentou grande vulnerabilidade aos desastres decorrentes de eventos hidrológicos extremos. Embora ao longo do tempo tenha avançado científica e tecnologicamente, o contexto atual, de mudanças climáticas, evidencia ainda mais essa vulnerabilidade. A fim de se evitar suas consequências, busca-se, cada vez mais, aprimorar a caracterização dos eventos extremos, auxiliando no processo de tomada de decisões (WMO, 2009). A metodologia de caracterização comumente aplicada envolve a definição de um modelo de probabilidade que se ajuste à série temporal avaliada, a fim de se construir uma curva que caracteriza os eventos de precipitação quanto a sua intensidade, duração e frequência de ocorrência, através da curva IDF. Esse procedimento, entretanto, representa um grande desafio na engenharia, devido à grande variabilidade temporal e espacial dos dados de precipitação e a ausência de procedimentos de escolha adequados (Nguyen *et al.*, 2017).

Devido à grande variabilidade dos eventos de precipitação e dos modelos de probabilidade existentes, não há um consenso entre os países, que recomendam em suas diretrizes, diferentes modelos de probabilidade. No caso do Brasil, não há um modelo de probabilidade definido em suas diretrizes, encontrando-se, na literatura, a avaliação de diferentes modelos de probabilidade aos dados de precipitação (Caldeira *et al.*, 2015; Batista; Coelho, 2013; Alves *et al.*, 2013; Pereira *et al.*, 2015).

Entretanto, vê-se como prática comum a caracterização dos eventos de precipitação de uma região desconsiderando a variabilidade espacial e a adequabilidade de diferentes distribuições de probabilidade. Isto é, a partir de dados de uma única estação pluviométrica, avalia-se a adequabilidade de um único modelo de probabilidade para a descrição dos eventos da região avaliada.

Dessa maneira, este estudo buscou avaliar os possíveis erros associados à prática de caracterização dos eventos de precipitação de uma região utilizando modelo e estação únicos, a partir de um estudo de caso conduzido na região de São Carlos. Os eventos de máxima precipitação diária da região foram caracterizados considerando diferentes estações pluviométricas e modelos de probabilidade e então comparados com os valores indicados pelo Departamento de Águas e Energia Elétrica – DAEE (2018).

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Coleta de Dados

Para a caracterização dos eventos de precipitação da região de São Carlos, localizada no estado de São Paulo, foram utilizadas séries precipitação diária de 11 estações pluviométricas obtidas no banco de dados do DAEE (DAEE, 2019). As estações estão localizadas nas cidades de Araraquara, Descalvado, Itirapina, Luís Antônio e São Carlos (Figura 1). A escolha das estações foi feita considerando a distribuição espacial (para que conseguissem representar a variabilidade espacial dos eventos de precipitação da região) e o comprimento da série (anos completos).

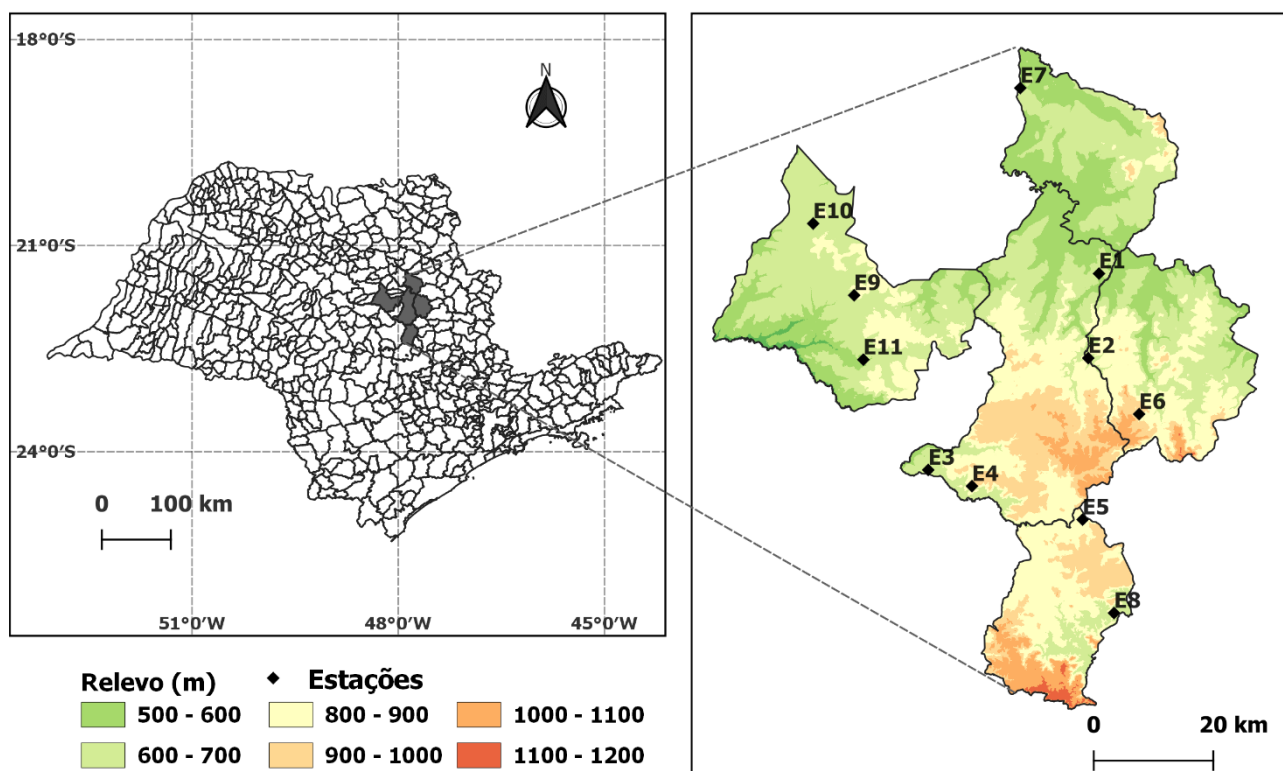


Figura 1 – Localização e relevo da área de estudo e disposição das estações pluviométricas

Foram então construídas séries de máxima precipitação diária anual (resumo de informações das estações e séries na Tabela 1), a partir dos dados coletados, considerando apenas anos válidos aqueles que possuísem no máximo 3 falhas nos meses menos chuvosos (Abril – Setembro) e nenhuma falha nos meses chuvosos (Outubro – Março).

Tabela 1 – resumo de informações das estações pluviométricas avaliadas

ID	Cidade	Prefixo DAEE	Período Observado	Anos Completos	Latitude	Longitude
E1	São Carlos	C4-019	1959 - 2018	50	21° 44' 53"	47° 46' 06"
E2	São Carlos	C4-092	1960 - 2017	43	21° 53' 08"	47° 47' 09"
E3	São Carlos	D5-076	1960 - 2017	49	22° 04' 03"	48° 02' 46"
E4	São Carlos	D4-106	1978 - 2017	30	22° 05' 38"	47° 58' 30"
E5	Itirapina	D4-037	1937 - 2017	70	22° 08' 54"	47° 47' 42"
E6	Descalvado	C4-071	1955 - 2018	60	21° 58' 36"	47° 42' 11"
E7	Luis Antônio	C4-056	1950 - 2018	64	21° 26' 46"	47° 53' 47"
E8	Itirapina	D4-036	1937 - 2018	70	22° 18' 01"	47° 44' 38"
E9	Araraquara	C5-050	1937 - 2018	74	21° 47' 00"	48° 10' 00"
E10	Araraquara	C5-012	1937 - 2018	37	21° 40' 00"	48° 14' 00"
E11	Araraquara	C5-017	1931 - 2018	72	21° 53' 17"	48° 09' 06"

A avaliação da adequabilidade de um modelo de probabilidade para a região foi feita através da determinação do diagrama de razão dos momentos – L, que envolve a comparação da curva teórica das distribuições de probabilidade avaliadas com a dispersão das razões de momentos-L amostrais (Peel *et al.*, 2001).

Para a caracterização dos eventos de precipitação pontualmente, foram modeladas, para as séries de máxima precipitação diária anual, 6 distribuições de probabilidade (Generalizada de Valores Extremos – GEV; Gumbel – GUM; Pearson III – PE3; Log-Pearson III – LP3; Log-Normal – LNO; Generalizada Logística – GLO) usualmente utilizados em análises hidrológicas (Pinto e Naghettini, 2007). A estimativa dos parâmetros foi feita pelo método dos momentos- L, por apresentar uma menor sensibilidade à variabilidade de amostragem (Hosking, 1990).

A comparação do desempenho dos modelos de probabilidade para cada uma das estações foi feita considerando 6 estatísticas (Máximo Erro Absoluto – MEA; Raíz do Erro Quadrado Médio – REQM; Coeficiente de Correlação – CC; Critério de Informação de Akaike Modificado - CIAM; Raíz Relativa do Erro Quadrado Médio – RREQM e Eficiência Kling-Gupta – EKG) que avaliam a aderência dos valores teóricos simulados aos dados observados, chamados aqui, de testes descritivos. Optou-se pela utilização de diferentes testes descritivos pelo fato de considerarem, em seu equacionamento, diferentes critérios para a adequabilidade do modelo. Sendo assim, a definição do melhor momento foi feita considerando esses diferentes aspectos de adequabilidade.

As distribuições de probabilidade foram então ranqueadas, para cada um dos testes descritivos avaliados, de acordo com seu desempenho, recebendo uma pontuação de 1 (melhor desempenho) a 6 (pior desempenho). A classificação final dos modelos foi determinada a partir da soma, para cada uma das distribuições, das pontuações obtidas em cada um dos testes descritivos (Figura 2).

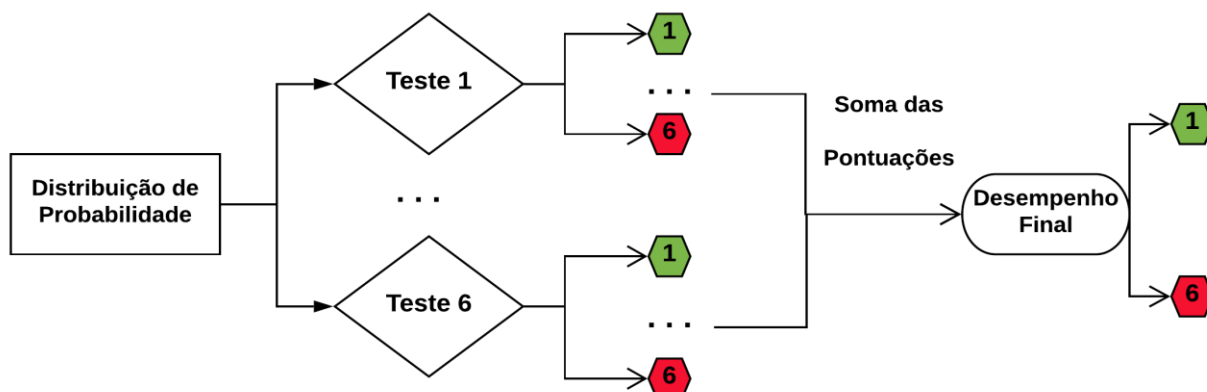


Figura 2 – Esquemática do método de ranqueamento final dos modelos de probabilidade

Determinadas as melhores distribuições de probabilidade para cada uma das estações avaliadas, de acordo com seu desempenho final, estimou-se os quantis de precipitação relativos aos períodos de retorno de 20, 50, 100 e 200 anos, para compará-los com os valores de referências indicados pelo DAEE (2018).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Considerando o diagrama de razão dos momentos-L (Figura 3), nota-se que não há evidências suficientes para optar por uma distribuição em detrimento das outras. Embora haja uma maior concentração das estações em torno da curva da distribuição GLO, não pode-se considerá-la como mais adequada para representar a região pois existem pontos consideravelmente distantes de sua curva.

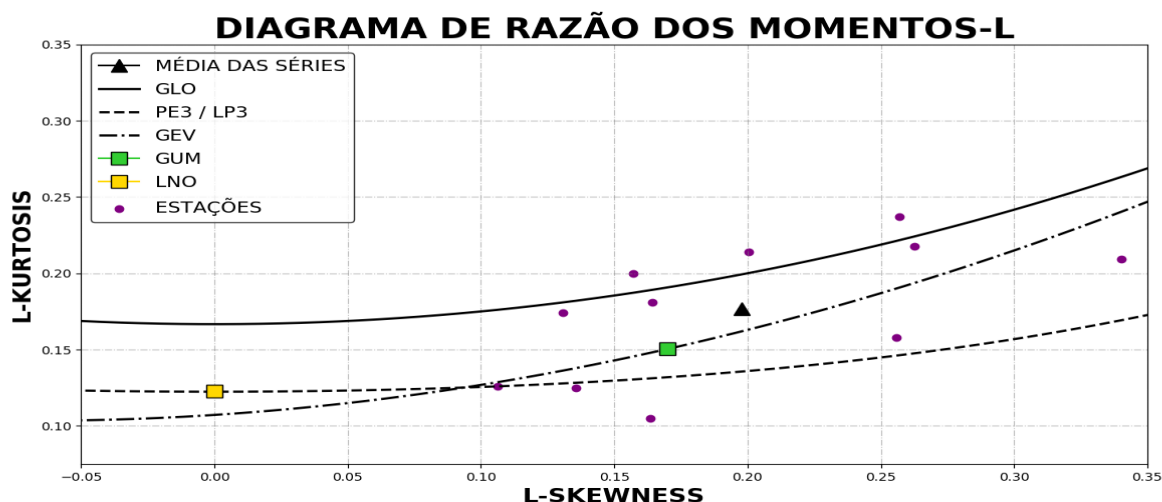


Figura 3 – diagrama de razão dos momentos-L para a região de São Carlos.

Avaliando a média das séries, que representa o ponto médio das estações, nota-se que este se encontra próximo ao ponto da distribuição GUM, da curva da distribuição GEV e da curva da distribuição GLO, dificultando a escolha de apenas um modelo de distribuição. A dispersão dos pontos das estações, no diagrama, evidencia a variabilidade espacial da precipitação de uma região.

Pode-se afirmar, pelo diagrama, que a distribuição LNO é inadequada para representar os eventos de precipitação da região. Tendo em vista os resultados do diagrama de razão dos momentos-L, determinou-se o melhor modelo de probabilidade para cada uma das estações avaliadas, considerando o desempenho final das distribuições nos 6 testes descritivos citados (Figura 4).

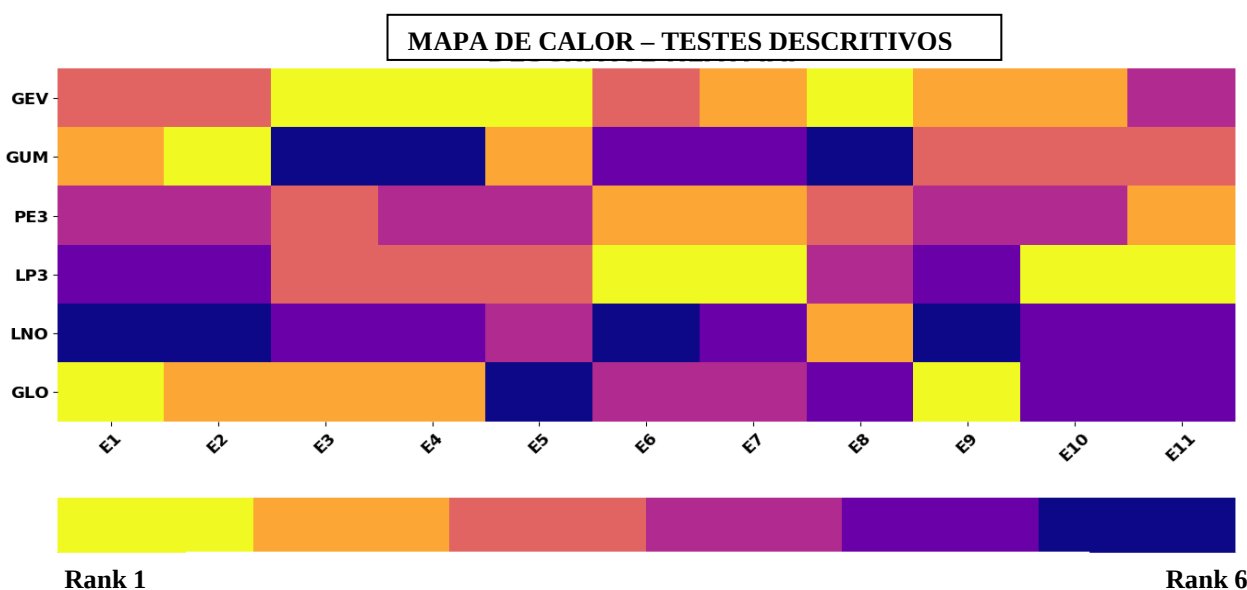


Figura 4 – Ranqueamento final dos modelos de probabilidade para cada uma das 11 estações avaliadas.

Nota-se a variabilidade do desempenho dos modelos de probabilidade considerando as diferentes distribuições de probabilidade. Essa heterogeneidade representa a variabilidade espacial da precipitação em uma determinada região, variando, consequentemente, a aderência dos modelos.

Pelo mapa de calor representado, tem-se que as distribuições LP3 e GEV obtiveram o melhor desempenho geral, obtendo a melhor classificação, cada uma, em 4 ocasiões. Entretanto, enquanto a distribuição GEV manteve sua classificação relativamente constante, a distribuição LP3 obteve uma variação maior, obtendo ranking 4 ou 5 em 4 ocasiões. Além disso, o mapa de calor confirma a inadequação da distribuição LNO para a região, notada também no diagrama de razão dos Momentos-L.

Considerando a melhor distribuição de probabilidades (Rank 1) para as estações avaliadas, determinou-se os quantis de precipitação associados a diferentes períodos de retorno (Tabela 2) e as diferenças encontradas (Tabela 3) entre os quantis indicados pelo DAEE (2018).

O desvio padrão dos quantis de precipitação pode ser entendido como a representação da variabilidade espacial da precipitação na região. Nota-se que essa variabilidade aumenta com o aumento do período de retorno avaliado, devido, também, às maiores incertezas associadas à predição de eventos com maior período de retorno.

Os quantis indicados pelo DAEE para a cidade de São Carlos foram superados, em todas as ocasiões, pelas estimativas realizadas. Considerando o fato de que os valores indicados foram retirados da IDF feita por Barbassa (1991), construída por uma série de precipitação relativamente antiga (1950 – 1988), deve-se ressaltar a necessidade de serem consideradas séries com dados recentes, que consigam representar a situação atual dos eventos extremos frente ao contexto de mudanças climáticas.

Tabela 2 – Quantis de precipitação (mm) estimados para cada uma das estações avaliadas. Hachuras indicam estações localizadas fora da cidade de São Carlos

Estação	Distribuição	PERÍODO DE RETORNO (TR - anos)			
		20	50	100	200
	DAEE	81,60	101,30	119,20	140,40
E1	GLO	136,48	158,29	176,71	197,12
E2	GUM	132,72	150,69	164,15	177,56
E3	GEV	141,08	168,07	190,57	215,13
E4	GEV	134,13	158,38	178,73	201,07
E5	GEV	113,18	125,03	133,48	141,53
E6	LP3	138,17	168,57	195,10	225,20
E7	LP3	124,69	146,17	163,80	182,82
E8	GEV	121,38	133,55	141,95	149,75
E9	GLO	130,84	153,28	172,94	195,39
E10	LP3	118,11	131,19	141,06	151,00
E11	LP3	113,24	127,39	138,20	149,22
Média		127,64	147,33	163,33	180,53
Desvio Padrão		10,01	15,86	21,76	29,06

Tabela 3 – Diferença entre os quantis de precipitação (mm) estimados e o indicado para cada uma das estações avaliadas. Hachuras indicam estações localizadas fora da cidade de São Carlos

Estação	Distribuição	Período de Retorno (TR - anos)			
		20	50	100	200
E1	GLO	54,88	56,99	57,51	56,72
E2	GUM	51,12	49,39	44,95	37,16
E3	GEV	59,48	66,77	71,37	74,73
E4	GEV	52,53	57,08	59,53	60,67
E5	GEV	31,58	23,73	14,28	1,13
E6	LP3	56,57	67,27	75,90	84,80
E7	LP3	43,09	44,87	44,60	42,42
E8	GEV	39,78	32,25	22,75	9,35
E9	GLO	49,24	51,98	53,74	54,99
E10	LP3	36,51	29,89	21,86	10,60
E11	LP3	31,64	26,09	19,00	8,82
Média		46,04	46,03	44,13	40,13
Desvio Padrão		10,01	15,86	21,76	29,06
Máximo		59,48	67,27	75,90	84,80

A magnitude das diferenças encontradas entre os valores de precipitação estimados e os indicados (Tabela 3) demonstra a importância da atualização dos estudos de precipitação. A média das diferenças, em todos os períodos de retorno avaliados, ficaram próximas a 40 mm de precipitação. Para períodos de retorno de 100 e 200 anos, foram encontradas diferenças máximas de 75,90 mm e 84,80 mm, respectivamente.

A comparação dos quantis de precipitação indicados para a cidade de São Carlos com os quantis estimados a partir de estações pluviométricas localizadas em outras cidades (hachurados), indica, novamente, a variabilidade espacial dos eventos de precipitação na região. Deve-se notar, que, considerando essa variabilidade, pode-se usar estações de outras cidades no processo de caracterização de precipitação, pelo fato de estarem localizadas, muitas vezes, próximas ao local de interesse, conseguindo, conseqüentemente, melhor representar o local quando comparadas com as estações disponíveis na cidade.

4. CONCLUSÃO

De acordo com os resultados, nota-se que nenhum dos seis modelos de probabilidade avaliados (GEV, GUM, PE3, LP3, LNO e GLO) pode ser rejeitado inicialmente, pelo fato de todos terem apresentado, em pelo menos uma estação, um bom desempenho nos testes descritivos. Sendo assim, ressalta-se a necessidade de se comparar distribuições de probabilidade, avaliando seu desempenho em diferentes testes para que a escolha do modelo seja feita corretamente.

A grande variabilidade encontrada nas estimativas de precipitação com altos períodos de retorno, considerando as diferentes estimativas realizadas, demonstra a necessidade de incorporar a questão da variabilidade espacial no processo de caracterização dos eventos extremos. Além disso, a

comparação dos quantis de precipitação demonstra também a imprescindibilidade da atualização constante das séries e estimativas de quantis de precipitação, considerando o cenário de mudanças climáticas e aumento da magnitude e ocorrência dos eventos extremos.

Pelo fato dos quantis de precipitação serem usados constantemente na gestão dos recursos hídricos e no dimensionamento de estruturas hidráulicas, constata-se que uma correta caracterização, em que seja considerada a variabilidade espacial (1), a grande quantidade de modelos de probabilidade e testes descritivos (2) e dados atualizados que representem a realidade atual (3), é vital para assegurar a segurança social, econômica e ambiental.

5. REFERÊNCIAS

ALVES, A. V. P; SANTOS, G. B. S; FILHO, F. C. M. M; SANCHES, L. (2013). “*Análise dos métodos de estimativa para os parâmetros das distribuições de Gumbel e Gev em eventos de precipitações máximas na cidade de Cuiabá-MT.*” REEC - Revista Eletrônica de Engenharia Civil, v.6, n.1, p.32-43.

BATISTA, M. L.; COELHO, G. (2013). “*Precipitação máxima diária anual na região sudeste do Brasil: distribuição de probabilidade e análise espacial*”. 69f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Lavras - UFLA.

BARBASSA, A.P. (1991). “*Simulação do efeito da urbanização sobre a drenagem pluvial na cidade de São Carlos, SP.*” Tese apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, para obtenção do título de Doutor em Engenharia Hidráulica e Saneamento. São Carlos, 1991. 312p.

CALDEIRA, T.L; BESKOW, S.; MELLO, C. R.; FARIA, L. C; SOUZA; M. R; GUEDES; H. A. S. (2015). “*Modelagem probabilística de eventos de precipitação extrema no estado do Rio Grande do Sul.*” Revista Brasileira de Engenharia Agrícola E Ambiental, v19. n.3, pg.197–203, <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v19n3p197-203>.

DEPARTAMENTO DE ÁGUA E ENERGIA ELÉTRICA – DAEE. (2018) “*Precipitações intensas no Estado de São Paulo*”. Disponível em: <http://www.daee.sp.gov.br/hidrologia/pluvi/precipita%C3%A7%C3%B5esintensas2018.pdf>. Acesso em: 08 de maio de 2019.

DEPARTAMENTO DE ÁGUA E ENERGIA ELÉTRICA – DAEE. (2019) “*Banco de Dados Hidrológicos*”. Disponível em: <http://www.hidrologia.daee.sp.gov.br/>. Acesso em: 08 de maio de 2019.

HOSKING, J. R. M. (1990). “*L-Moments: Analysis and Estimation of Distributions Using Linear Combination of Order Statistics.*” Journal of the Royal Statistical Society, v.52, n.1, pg.105–124.

NGUYEN, T.-H; OUTAYEK, S. E; LIM, S. H; NGUYEN, V.-T.-V. (2017). “A systematic approach to selecting the best probability models for annual maximum rainfalls – A case study using data in Ontario (Canada).” Journal of Hydrology, v. 553, pp. 49–58.
<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.07.052>.

PEEL, M. C.; WANG, Q. J.; VOGEL, R. M; McMAHON, T. A; (2001). “*The utility of L-moment ratio diagrams for selecting a regional probability distribution,*” Hydrological Sciences Journal, 46:1, 147-155, DOI: 10.1080/02626660109492806

PEREIRA, G. A.; NETO, J. O. M; JUNQUEIRA, R.; AIRES, U. R. V.; MELLO; C. R.; (2015). “*Estudo de eventos hidrológicos extremos para o estado de sergipe: análise da precipitação máxima diária anual*”. Apresentado no Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola – CONBEA.

WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION - WMO. (2009). “*Guide to hydrological practices, volume II: Management of water resources and application of hydrological practices.*” v.6, n. 168. Geneva, Switzerland, 302 pp.