Revista Brasileira de Climatologia
Brazilian Journal of Climatology
OPEN ACCESS

A METODOLOGIA ESTATÍSTICA DOS EVENTOS EXTREMOS DE PRECIPITAÇÃO: UMA PROPOSTA AUTORAL PARA ANÁLISE DE EPISÓDIOS PLUVIOMÉTRICOS DIÁRIOS

The statistical methodology of extreme precipitation events: an authorial proposal for analysis of daily rainfall episodes

La metodologia estadística de eventos de precipitación extrema: una propuesta autoral para el análisis de episódios de lluvia diaria

Jander Barbosa Monteiro
Universidade Estadual Vale do Acaraú (UVA)
jander_monteiro@uvanet.br

Maria Elisa Zanella
Universidade Federal do Ceará (UFC)
elisazv@terra.com.br

Resumo: Os acumulados máximos de precipitação, também denominados eventos extremos de chuva na literatura científica, geralmente possuem energia com potencial para deflagrar desastres de grande magnitude, em especial quando ocorrem em localidades habitadas por populações em situação de vulnerabilidade. Tais eventos, caracterizados por possuírem grandes desvios em relação ao estado climático moderado, costumam ser categorizados a partir do emprego de metodologias estatísticas, embora existam outras possibilidades de análise que consideram, por exemplo, sua magnitude a partir dos danos materiais e humanos que ocasionam. Embora sejam considerados episódios raros, cientistas vinculados ao Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC) afirmam que os eventos extremos estão cada vez mais recorrentes e intensos, o que representa um alerta diante do contexto de crise/emergência climática observado atualmente. No intuito de avaliar, de forma objetiva e operacional, a ocorrência e intensidade de episódios pluviométricos diários considerados extremos, propõe-se aqui uma nova metodologia estatística autoral que permite categorizar episódios diários de precipitação para uma determinada localidade, considerando todo o acumulado verificado em longas séries históricas. Para validar sua utilização e avaliar sua eficácia, foram considerados registros obtidos a partir do site do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), selecionando sete cidades brasileiras representativas do território nacional e com distintos comportamentos de precipitação. Os resultados preliminares promissores possibilitaram uma análise comparativa entre as localidades sobre a recorrência e intensidade de eventos extremos diários, operacionalizando o conceito e empregando diferentes classes/níveis de intensidade, considerando-se sempre a realidade de cada localidade quanto ao comportamento da chuva.

Palavras-chave: Chuva Extrema. Técnicas Estatísticas. Climatologia dos Extremos

Abstract: Maximum precipitation accumulators, also called extreme rainfall events in the scientific literature, generally have energy with the potential to trigger major disasters, especially when they occur in locations inhabited by populations in vulnerable situations. Such events, characterized by having large deviations from the moderate climatic state, are usually categorized from the use of statistical methodologies, although there are other possibilities of analysis that consider, for example, their magnitude from the material and human damage they cause. Although rare episodes are considered, scientists linked to the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) say that extreme events are increasingly recurrent and intense, which represents a warning in the context of climate crisis/emergency observed today. In order to evaluate, objectively and operationally, the occurrence and intensity of daily rainfall episodes considered extreme, we propose here a new authorial statistical methodology that allows categorizing daily episodes of precipitation for a given locality, considering all the accumulated in long historical series. To validate its use and evaluate its effectiveness, records obtained from the website of the National Institute of Meteorology (INMET) were considered, selecting seven Brazilian cities representing the national territory and with different precipitation behaviors. The promising preliminary results allowed a comparative analysis between localities on the recurrence and intensity of extreme daily events, operationalizing the concept and employing different classes/intensity levels, always considering the reality of each locality regarding the behavior of rain.

Keywords: Extreme Rain. Statistical Techniques. Climatology of Extremes

Resumen: Las precipitaciones máximas acumuladas, también denominadas eventos extremos de lluvia en la literatura científica, generalmente tienen energía con potencial de desencadenar desastres de gran magnitud, especialmente cuando ocurren en lugares habitados por comunidades vulnerables. Estos eventos, caracterizados por presentar grandes desviaciones del estado climático moderado, generalmente se clasifican utilizando metodologías estadísticas, aunque existen otras posibilidades de análisis que consideran, por ejemplo, su magnitud en función de los daños materiales y humanos que provocan. Aunque sean considerados episodios raros, científicos vinculados al Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC) aseguran que los eventos extremos son cada vez más recurrentes e intensos, lo que representa un alerta en el contexto de la crisis/emergencia climática que se observa actualmente. Con el fin de evaluar de manera objetiva y operativa la ocurrencia e intensidad de los episodios de lluvia diarios considerados extremos, aquí se propone una nueva metodología estadística autoral que permite categorizar los episodios de lluvia diarios para una determinada localidad, considerando todas las series históricas acumuladas observadas en largos periodos de tiempo. Para validar su uso y evaluar su efectividad, se consideraron registros obtenidos del sitio web del Instituto Nacional de Meteorología (INMET), seleccionando siete ciudades brasileñas representativas del territorio nacional y con comportamientos de precipitación diferentes. Los prometedores resultados preliminares permitieron un análisis comparativo entre las localidades sobre la recurrencia e intensidad de los eventos extremos diarios, operacionalizando el concepto y empleando diferentes clases/niveles de intensidad, siempre considerando la realidad de cada localidad en cuanto al comportamiento de las lluvias.

Palabras clave: Lluvia Extrema. Técnicas Estadísticas. Climatología de los extremos

Submetido em: 15/09/2022
Aceito para publicação em: 14/03/2023
Publicado em: 31/03/2023

1. INTRODUÇÃO

Os acumulados máximos de precipitação, genericamente denominados de eventos extremos de chuva na literatura científica (GOODIN et. al, 2004; IPCC, 2012; MARENGO et. al, 2009; MONTEIRO, ZANELLA, 2017; XAVIER, XAVIER, ALVES, 2007), geralmente possuem energia com potencial para deflagrar desastres de grande magnitude (MONTEIRO; ZANELLA, 2019), em especial quando ocorrem em localidades habitadas por populações vulneráveis.

Tais eventos são caracterizados, em termos climatológicos, por possuir grandes desvios de um estado climático moderado (MARENGO et. al, 2009), representando episódios raros, de aparição extraordinária (MONTEIRO, 2016), os quais podem ser compreendidos e analisados a partir de perspectivas físico-estatísticas (quando metodologias/técnicas estatísticas são empregadas para tentar avaliar a magnitude do evento desencadeado por um ou mais sistemas meteorológicos específicos) ou até mesmo sociais (a partir dos danos materiais e humanos associados).

Contudo, ainda que sejam caracterizados como episódios raros, especialistas vinculados ao Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC) afirmam que os eventos extremos estão cada vez mais recorrentes e intensos, o que representa um alerta diante do contexto de crise climática experenciado atualmente. A nível de Brasil, o Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas (PBMC) também endossa tal problemática (RIBEIRO; SANTOS, 2016), a qual ganha maior notoriedade nas mídias eletrônica e impressa quando desastres socionaturais (HERRMANN, 2016) de grandes proporções ocorrem em distintas localidades do país, em virtude do potencial disruptivo de tais acumulados superiores de precipitação.

É bem verdade que os danos podem estar relacionados, em grande parte, aos diferentes graus de exposição e vulnerabilidade de algumas populações em distintas localidades do país. No entanto, em termos de acumulados registrados em uma longa série histórica, também se sabe que aquilo que é considerado como extremo para uma localidade, pode não ser necessariamente para outra, em virtude da diversidade de climas existentes no país, bem como da variedade de sistemas meteorológicos que atuam de forma distinta no tempo e espaço.

Considerando tal particularidade, como então definir (de forma objetiva e operacional) limiares de precipitação que permitam categorizar determinados episódios de precipitação diária como extremos? A estatística, nesse sentido, pode oferecer inferências ao que seria denominado como extremo de precipitação, analisando desde a frequência destes eventos, até a sua magnitude. Tal exercício, relativamente objetivo, representa um importante passo que permite não só corroborar com tal problemática levantada por muitos cientistas e pesquisadores (em que um cenário desanimador de extremos climáticos figuraria como um dos maiores problemas já encarados hodiernamente por nossa sociedade), além de oferecer elementos para subsidiar a tomada de decisão em diferentes esferas.

Assim, tal pesquisa objetivou propor uma metodologia estatística autoral que permitisse a identificação (de forma operacional) e categorização de eventos extremos diários de precipitação em distintas localidades, avaliando sua eficácia a partir de aplicação em diferentes contextos no território brasileiro, selecionando postos pluviométricos que contemplassem o comportamento diverso da chuva em tais porções do território.

Espera-se, desta forma, que tal técnica estatística possa contribuir diretamente para os estudos relacionados à eventos extremos máximos de chuva, no intuito de oferecer uma metodologia operacional capaz de definir limiares que permitam categorizar os episódios máximos de precipitação, subsidiando assim análises que possibilitem a avaliação da intensidade dos episódios, bem como a recorrência de tais eventos nas últimas décadas, além da discussão e operacionalização do conceito de evento extremo.

Embora exista na literatura científica uma ampla discussão teórica voltada a definição do que seria considerado como evento extremo, em termos operacionais tal acepção engloba diferentes possibilidades de interpretação, considerando os distintos vieses de análise (estatístico, social, ambos etc.) e metodologias empregadas.

No âmbito da Climatologia, inúmeras técnicas estatísticas são empregadas na avaliação espaço-temporal, definição e categorização de episódios extremos de precipitação, em especial quando são avaliados períodos mais extensos (ano, semestre, quadrimestre etc.). É o caso dos desvios quartílicos, da Técnica dos Quantis (XAVIER; XAVIER, ALVES, 2007), do Índice de Anomalia de Chuva – IAC (ROOY, 1965) ou até mesmo técnicas mais simples que incluem, por exemplo, o desvio padrão em relação aos acumulados analisados.

Contudo, tais metodologias podem apresentar certas limitações quando utilizadas na avaliação de episódios extremos de precipitação em escala diária, por diversos motivos que incluem desde sua aplicação, até mesmo a definição de intervalos de extremos que não parecem tão “extremos” assim, uma vez que englobam em suas análises todos os acumulados de uma série histórica, incluindo assim inúmeros dias sem precipitação que acabam por trazer limiares de chuva que não condizem com aquelas definições conceituais caracterizadas como extremos.

Comumente, também se observa na literatura científica a delimitação de acumulados superiores que são caracterizados como extremos sem estabelecimento aparente de critérios objetivos e/ou estatísticos. Gao, Jeremy e Fillipo (2006), Frich, Alexander, Dellamarta et. al (2002), Conti (2011) e Teixeira (2004) sugerem o limiar inferior de 50 mm acumulados em 24 horas para definir extremos de chuva. Contudo, existem outros pesquisadores que utilizam 60 mm diários como limiar ou até mesmo 30 mm se estes ocorrerem em curto espaço de tempo (em 3 ou 4 horas, por exemplo).

No intuito de contornar certas limitações impostas pelas metodologias estatísticas supramencionadas, bem como definições subjetivas e aleatórias sobre os extremos de precipitação diária, Silva (2012) sugeriu, de forma operacional e muito coerente, a Metodologia dos Máximos de Precipitação que, além de desconsiderar acumulados inferiores à 50 mm em seu cálculo, permite uma categorização em quatro níveis de eventos extremos.

Ainda que tal metodologia operacional seja muito eficaz e figure atualmente como uma das técnicas estatísticas que melhor representa uma análise de extremos diários em distintos cenários, a mesma ainda apresenta alguns pontos passíveis de adequação e análise, como por exemplo quando desconsidera os acumulados abaixo de 50 mm. Ora, se o objetivo é avaliar os “extremos” de uma determinada localidade, não se deve desconsiderar nenhum acumulado. Ademais, utilizar uma classe considerada “normal” na metodologia pode não parecer adequado em termos de acumulados registrados nesta classe, uma vez que para determinadas localidades (como no semiárido brasileiro), o “normal” é apresentar dias sem chuva ou acumulados não tão expressivos.

De qualquer forma, esta metodologia (Máximos de Precipitação) foi aqui utilizada como inspiração, além de outra bem usual na definição de extremos (Técnica dos Quantis), a

qual é empregada nos primeiros passos da aplicação da metodologia autoral que será apresentada adiante.

Assim, com esse suporte para a elaboração da metodologia autoral que visa definir extremos diários de precipitação, categorizando-os (em três classes de intensidade), além da possibilidade de incluir toda a série histórica de uma dada localidade na análise, a mesma foi aplicada em sete cidades brasileiras, as quais foram selecionadas em virtude de sua localização diversa, o distinto comportamento da precipitação, além de apresentarem registros que praticamente não possuem falhas em uma série histórica de 30 anos (1992-2021).

2. AS CONCEPÇÕES TEÓRICAS E OPERACIONAIS UTILIZADAS NA DEFINIÇÃO DE EPISÓDIOS PLUVIOMÉTRICOS EXTREMOS

Os episódios pluviométricos extremos representam desde aqueles acumulados superiores (máximos), quanto os inferiores (quando se verificam acumulados inexpressivos) em determinada série histórica analisada. Na literatura científica, tais eventos geralmente encontram-se atrelados àqueles episódios raros, de aparição extraordinária, possuindo potencial deflagrador de desastres naturais ou, na melhor acepção do termo, caberia empregar a terminologia desastres socionaturais, a qual vem sendo amplamente difundida e aceita na América Latina, embora no Brasil a maioria dos autores ainda façam uso de outras nomenclaturas (como desastres socioambientais ou naturais) para fazer referência aos episódios de grande magnitude que geralmente ocasionam danos materiais e humanos significativos em determinadas localidades.

Contudo, sabe-se que apenas tais acumulados expressivos (em termos de volume, em milímetros) não figuram como a única razão dos inúmeros danos ocasionados nas localidades em que são verificados. Ora, variáveis como a vulnerabilidade, relacionada a uma “série de contingências políticas, econômicas, culturais, tecnológicas etc.” (MENDONÇA, 2011, p.114) acabam potencializando os danos associados à ocorrência de episódios pluviométricos extremos.

Outras variáveis, como a resiliência, também se apresentam como de suma importância, estando associada à dificuldade que determinadas comunidades encontram em enfrentar ou adaptar-se, embora em sua acepção original o termo apresente uma outra

conotação, relacionada à capacidade de determinada população recuperar-se, retornando às condições originais, o que representaria algo passível de contestação, uma vez que essa condição original geralmente representa uma situação de risco (MONTEIRO, ZANELLA, 2019).

Em países como o Brasil, em que a urbanização se deu de forma acelerada, desordenada e com a presença de infraestruturas precárias que denunciam a desigualdade socioeconômica verificada em distintos territórios, tais variáveis figuram como as principais contribuintes no que diz respeito à dificuldade de respostas positivas diante de tais eventos adversos caracterizados como extremos. Inclusive, vulnerabilidade, resiliência, entre outras variáveis e conceitos associados, representam claramente a concepção mais social/integral envolta no conceito de evento extremo. Porém, não surpreende descobrir que tais variáveis são de difícil mensuração/operacionalização, em grande parte por conta da subjetividade empregada na análise.

Assim, no intuito de determinar de forma mais operacional um evento extremo, o emprego de metodologias estatísticas figura como uma alternativa objetiva na definição de limiares para episódios considerados extremos.

Em se tratando de acumulados diários, nota-se claramente uma dificuldade em selecionar alguma metodologia que não apresente limitações, principalmente com relação à definição de um limiar para evento extremo de chuva coerente e aceito pela comunidade científica, ou até mesmo não considerando todos os registros da série histórica em análise (incluindo aqueles acumulados inexpressivos).

Em termos de operacionalização do conceito, também não seria coerente definir um limiar específico para qualquer localidade e sem critério aparente, uma vez que o comportamento da chuva é distinto nas mais variadas porções do território. Então, o que pode figurar como extremo para uma localidade, pode não ser necessariamente para outra. Tal peculiaridade precisa ser considerada e, nesse sentido, a estatística se apresenta como importante aliada, possibilitando uma definição mais objetiva e operacional.

Claro que um evento superior a 100 mm acumulados em 24h é certamente considerado como extremo na mídia, bem como na comunidade científica. Conti (2011) considera até mesmo acumulados que ultrapassam 50 mm ou 30 mm, se estes ocorrerem em uma escala horária. Mesmo que ocorram em poucas horas, ainda assim podem desencadear danos diversos, em especial nas áreas densamente urbanizadas.

De todo modo, definir operacionalmente o que seria considerado como “normal” do ponto de vista estatístico já representa um importante avanço na definição de um evento extremo, subsidiando até outras análises que incluem variáveis mais subjetivas.

Afinal, tal operacionalização do conceito de evento extremo encontra-se alinhada à sua definição teórica do ponto de vista físico-estatístico, uma vez que o mesmo é compreendido como um episódio raro em um determinado lugar e época do ano, ou seja, tão ou mais raro que a ocorrência de um acumulado superior ou abaixo do limite inferior da gama de valores da variável observada (MONTEIRO; ZANELLA, 2019).

Goodin et. al (2004) admitem que tais eventos são raros em frequência, magnitude e/ou duração do ponto de vista estatístico e afirmam que a capacidade de reconhecer determinados episódios como extremos também depende da extensão dos registros climáticos. Daí a importância de se avaliar o comportamento da chuva de uma dada localidade a partir de longas séries históricas.

O Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas – IPCC, por exemplo, define evento extremo como “a ocorrência de um valor de uma variável meteorológica ou climática acima (ou abaixo) de um valor limite próximo à extremidade superior (ou inferior) do intervalo de valores observados da variável” (IPCC, 2012, p.4, tradução nossa).

Assim, nota-se, a partir da definição do IPCC (2012), como a estatística pode contribuir para definir e analisar eventos extremos de precipitação. Entre as técnicas mais difundidas, estão aquelas que consideram rigorosos intervalos ao analisar as longas séries históricas, com valores abaixo do percentil 10 ou acima do 90 da função de densidade de probabilidade observada (XAVIER; XAVIER, ALVES, 2007; IPCC, 2012).

> Quantis (“quantiles”, “fractiles”) são medidas de separação para distribuições de probabilidade ou para suas amostras. Um quantil de ordem p (definido para $0 < p < 1$) é um valor numérico que secciona a distribuição em duas partes, com probabilidades p (à esquerda deste quantil “teórico”) e 1-p (à direita). [...] Até o quantil de ordem 5% estão compreendidos “valores extremos inferiores”, ao passo que a partir do quantil de ordem 95% encontram-se valores extremos superiores (XAVIER; XAVIER; ALVES, 2007, p.3).

O *Expert Team on Climate Change Detection Monitoring and Indices* (ETCCDMI), por exemplo, recomenda a utilização do parâmetro percentil 99%, representando assim 1% das

precipitações mais significativas, considerando a série de dados utilizada. Muitos pesquisadores consideram este limiar de maneira satisfatória em suas regiões para identificar acumulados diários expressivos com potencial de deflagração de impactos diversos, dentre os quais podem ser citados os recentes estudos desenvolvidos por Goudard e Mendonça (2017), Paz e Sanches (2017) e Machado et.al. (2019).

No entanto, Monteiro (2016), ao considerar uma longa série histórica (maior que 30 anos) de dados diários em regiões que apresentam chuvas escassas, irregulares e mal distribuídas ao longo do ano, como no caso do semiárido brasileiro, atestou que o número significativo de dias sem chuva ou com acumulados inexpressivos acabam por dificultar a utilização do percentil 99%, uma vez que o resultado não representaria um acumulado tão elevado, com potencial deflagrador de danos significativos.

Assim, outras metodologias que desconsideram acumulados inexpressivos ou nulos (já que estes, por ocorrerem com maior frequência, interferem na análise dos registros históricos), representam alternativas mais usuais na definição de limiares de precipitação caracterizados como extremos.

Gao, Jeremy e Fillipo (2006), Frich, Alexander, Dellamarta et. al. (2002), Silva (2012) e Monteiro e Zanella (2017), por exemplo, consideraram o limite inferior de 50 mm acumulados em 24 horas para posterior aplicação de fórmulas estatísticas, utilizando a Metodologia dos Máximos de Precipitação, a qual define quatro categorias de intensidade de eventos extremos de chuva (variando de intensidade pequena à intensidade muito grande), o que denota maior cautela, bem como definição objetiva/operacional a partir de longas séries históricas.

Mesmo que tal metodologia seja coerente na definição dos limiares e de fácil aplicação, alguns pontos ainda são passíveis de questionamento. Afinal, por que utilizar 50 mm e não 60 mm? Ou, quem sabe, 30 mm? E, porque considerar uma classe “normal” com acumulados acima de 50 mm, uma vez que tais acumulados podem, do ponto de vista físico-estatístico, ou até mesmo social, figurarem como eventos extremos? Ora, em se tratando de eventos de precipitação diária e considerando longas séries históricas, o “normal” seria observar acumulados inexpressivos ou até mesmo não ocorrer precipitação.

Ademais, definir limiares de 50 mm para qualquer localidade pode não ser representativo, uma vez que não considera o comportamento da chuva de cada região. Ou

seja, cabe utilizar uma metodologia que englobe, ao máximo, a gama de valores dos registros históricos diários.

Tais lacunas e limitações parecem ser contornadas na adoção da Metodologia Estatísticas dos Eventos Extremos de Precipitação (M3EP), que será apresentada e proposta adiante, uma vez que esta considera três classes de eventos extremos (chuva moderada, forte e muito forte), emprega a mediana em sua fórmula ao invés da média (além de considerar também o desvio padrão), bem como utiliza todos os acumulados de precipitação diária já registrados na série histórica em análise (incluindo aqueles inexpressivos).

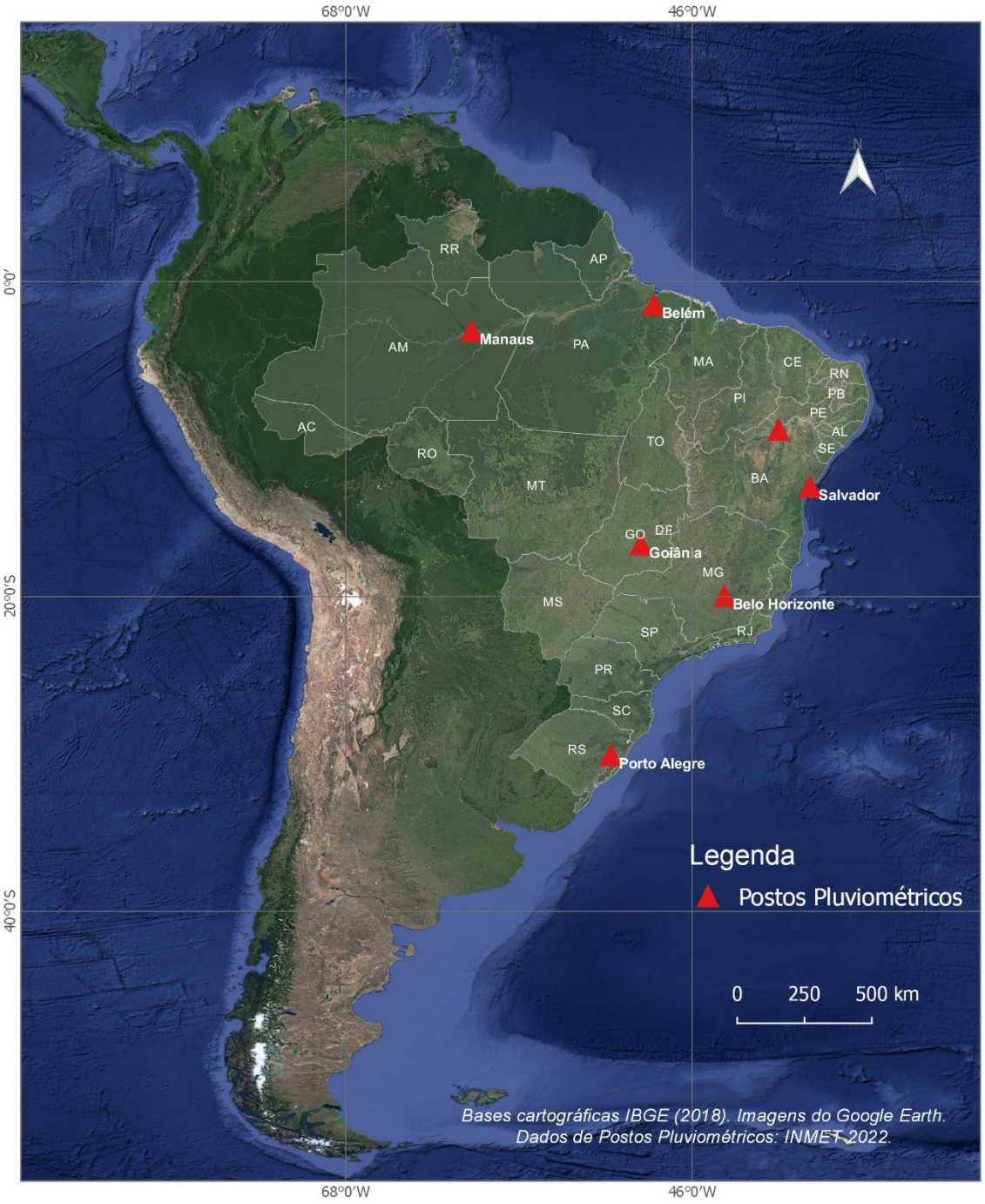
3. METODOLOGIA

No intuito de contemplar os objetivos da proposta, fez-se necessário alguns procedimentos. Inicialmente, foi realizada uma prospecção em artigos de revistas especializadas, bem como livros e relatórios do IPCC que possibilitassem uma discussão teórica e operacional sobre evento extremo, no intuito de subsidiar a construção da metodologia estatística para definir eventos extremos diários de chuva, bem como possíveis adequações/ajustes na mesma, na medida em que foram realizados os pré-testes.

Para a devida aplicação da metodologia, aqui denominada de Metodologia Estatística dos Eventos Extremos de Precipitação (M3EP), alguns procedimentos foram adotados antes mesmo de serem aplicadas as fórmulas que definiram as classes de extremos de precipitação diária.

Em um primeiro momento, foram selecionados dados de 7 postos localizados em cidades representativas a nível de território brasileiro, em termos de abrangência espacial, a partir de registros históricos disponíveis no site do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). São elas: Manaus-AM, Belém-PA, Petrolina-PE, Salvador-BA, Goiânia-GO, Belo Horizonte-MG e Porto Alegre-RS (Figura 1).

Figura 1 – Localização geográfica dos postos pluviométricos selecionados para aplicação e teste da Metodologia Estatística dos Eventos Extremos de Precipitação (M3EP)



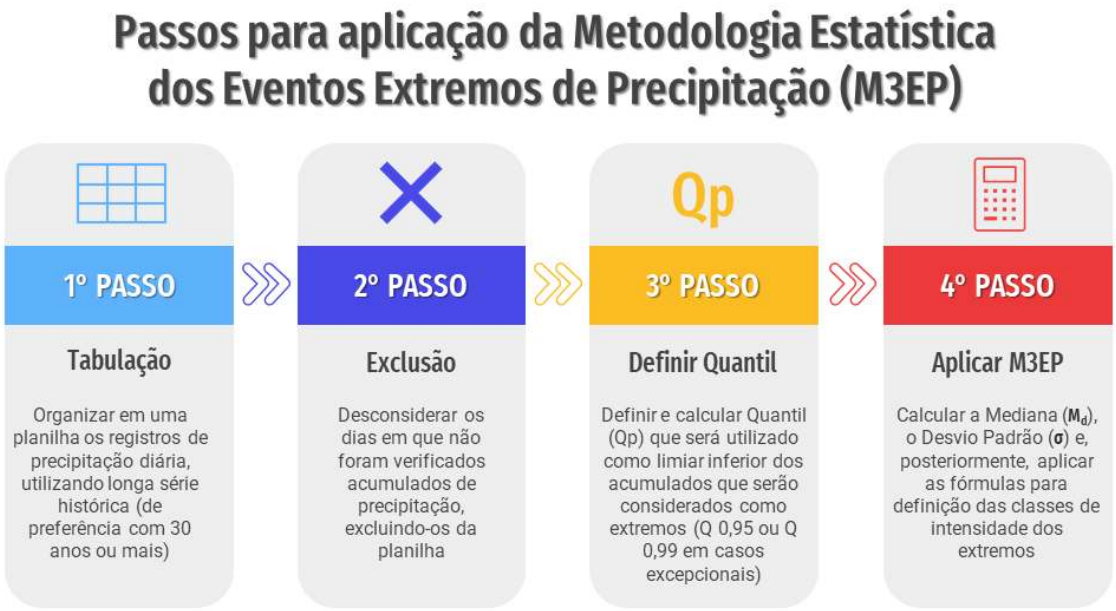
Fonte: Elaborado pelos autores (2022)

Na escolha dos postos, foram considerados os seguintes critérios: selecionar ao menos uma cidade por região do Brasil (considerando a regionalização oficial proposta pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE), postos pluviométricos com registros diários entre 1992-2021 (30 anos) que praticamente não apresentassem falhas, além de incluir também dois postos extras de cidades com comportamento de chuva bem distintos: um com muitos

registros de dias de precipitação (Belém-PA) e outro com poucos registros (característico do semiárido brasileiro, no caso Petrolina-PE). A inclusão deste último critério fez-se necessário para analisar a eficácia da técnica estatística em diferentes cenários, a fim de avaliar se os limiares de precipitação e suas respectivas classes de eventos extremos seriam coerentes.

Na tabulação dos dados, somente os dias sem chuva são desconsiderados. Os demais registros, ainda que representem acumulados insignificantes (como 0,1 mm, por exemplo) foram considerados na aplicação da metodologia (Figura 2).

Figura 2 – Passos para aplicação da Metodologia Estatística dos Eventos Extremos de Precipitação (M3EP)



Fonte: Elaborado pelos autores (2022)

Em seguida, os acumulados restantes foram dispostos em ordem crescente (do menor acumulado para o maior acumulado) e o Quantil[1] 0,95 (utilizado como referência) foi definido como limiar inferior dos acumulados que serão utilizados na fórmula para obtenção dos intervalos considerados como extremos, de forma categorizada.

[1] Considerando o comportamento da precipitação de uma determinada localidade em análise, caso o pesquisador avalie que os acumulados definidos como extremos a partir do Q (0,95) não representam acumulados tão "extremos" assim (isso pode ocorrer em virtude da presença de muitos dias com acumulados inexpressivos e/ou poucos dias sem chuva), o mesmo pode adotar um Quantil ainda mais extremo: 0,99. Contudo, optou-se aqui pelo Quantil 0,95, ou seja, significa dizer que apenas em 5% das observações (considerando os dias em que ocorreram precipitação) verificam-se acumulados que serão incluídos no cálculo para definir intervalos de precipitação considerados como extremos (superiores).

A definição do limiar inferior para categorizar os extremos, estabelecido pelo Quantil 0,95, se deu a partir da realização do cálculo da ordem quantílica, com a seguinte equação:

$$(1) \qquad Q(P)=yi+\{[P-Pi]/[Pi+1-Pi]\}*[yi+1-yi] \quad [2]$$

Como se tratam de muitos registros, existe uma outra forma mais simples de obtenção do Quantil 0,95. Basta ordenar os acumulados, do menor para o maior (excluindo, claro, aqueles sem registro de precipitação) e, em seguida, verificar o número de registros (no caso, este dado é representado por N na fórmula quantílica, ou seja, o número de elementos da série). Considerando o número total de registros, basta somá-lo por + 1 e, na sequência, testar aleatoriamente alguns números de ordem (cada acumulado possui um número de ordem), a partir de uma divisão de alguns números de ordem escolhidos aleatoriamente por N+1, até que seja verificado o resultado esperado: 0,95.

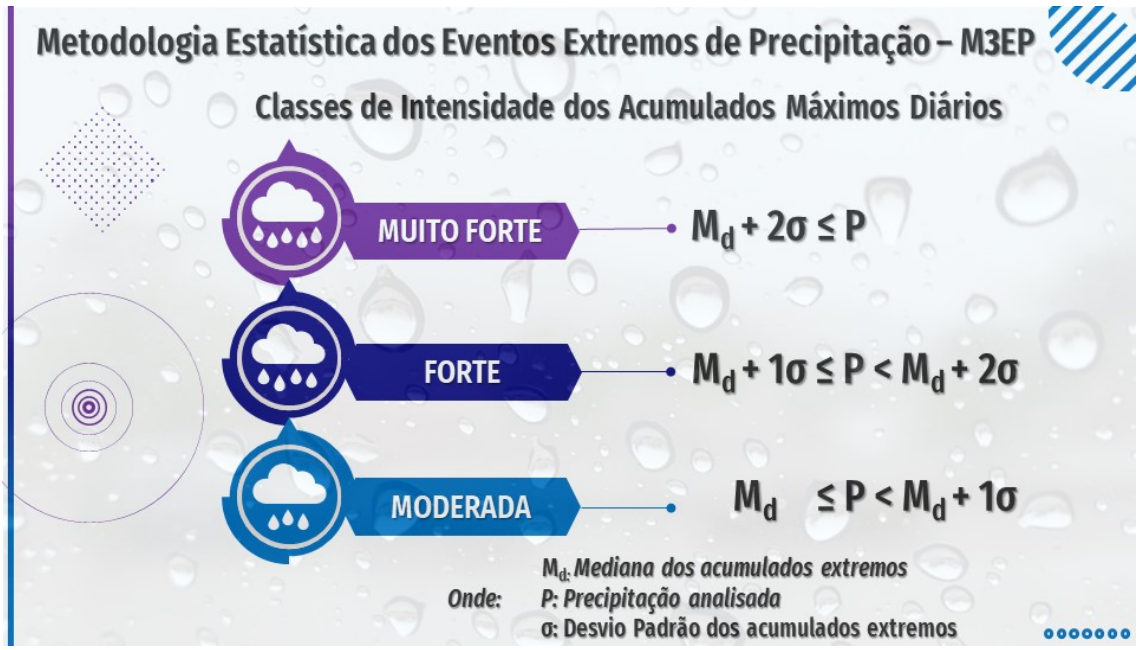
Por exemplo, como o posto pluviométrico localizado em Porto Alegre apresentou 4.310 dias com registros de precipitação, ao realizar alguns testes, descobriu-se que o Q(0,95) estava no número de ordem 4.096, uma vez que ao dividir este último por 4.311 (N+1, ou seja, 4.310 + 1), obteve-se o seguinte resultado: 0,95012758. Assim, o registro (em mm) representado nesse número de ordem (no caso, 41,8 mm) foi utilizado como limiar inferior para posterior cálculo da metodologia. Em seguida, basta criar uma planilha considerando este acumulado em diante (iguais ou superiores a 41,8mm).

Após tal definição do limiar inferior (Q 0,95), a Metodologia Estatística dos Eventos Extremos de Precipitação (M3EP) foi aplicada, a partir de fórmula que considera a mediana[3] e o desvio padrão dos acumulados que restaram nas planilhas dos postos pluviométricos selecionados (aqueles acima do Quantil 0,95), utilizando-se de três classes de intensidade dos acumulados máximos diários (Figura 3).

[2] Onde: **Q(P)** = Quantil (Ex: Q(0,95) é o quantil que corresponde à ordem quantílica P = 0,95); **i** = número de ordem para cada valor (ordenar de forma crescente); **y** = valor correspondente a cada número de ordem i (no caso, seria o total pluviométrico em mm); **Pi** = Ordem quantílica (Pi= i/N+1); **N** = Número de elementos da série; o produto seria o resultado da divisão da ordem quantílica Pi.

[3] Optou-se aqui por utilizar a mediana, ao invés da média, porque esta última, do ponto de vista estatístico, pode mascarar a realidade.

Figura 3 – Fórmulas para obtenção dos limiares de precipitação e definição das classes de intensidade dos acumulados máximos diários



Fonte: Elaborado pelos autores (2022)

Por fim, os registros de precipitação extrema de cada posto foram classificados em uma das três classes de intensidade dos acumulados diários (chuva moderada, forte ou muito forte).

De forma concomitante, além da intensidade, também foi identificada a frequência de alguns eventos extremos nas três últimas décadas, em especial daqueles que figuram na categoria muito forte, através da confecção de conteúdo gráfico-estatístico, que permitiu avaliar a recorrência de tais eventos.

4. RESULTADOS

Considerando as sete localidades selecionadas (Manaus-AM, Belém-PA, Petrolina-PE, Salvador-BA, Belo Horizonte-MG, Goiânia-GO e Porto Alegre-RS) para aplicação da metodologia, mediante critérios já mencionados, observam-se claramente algumas particularidades e curiosidades já nos primeiros passos que antecedem a aplicação da metodologia, ao ser realizada a tabulação dos dados e exclusão dos dias sem precipitação da planilha.

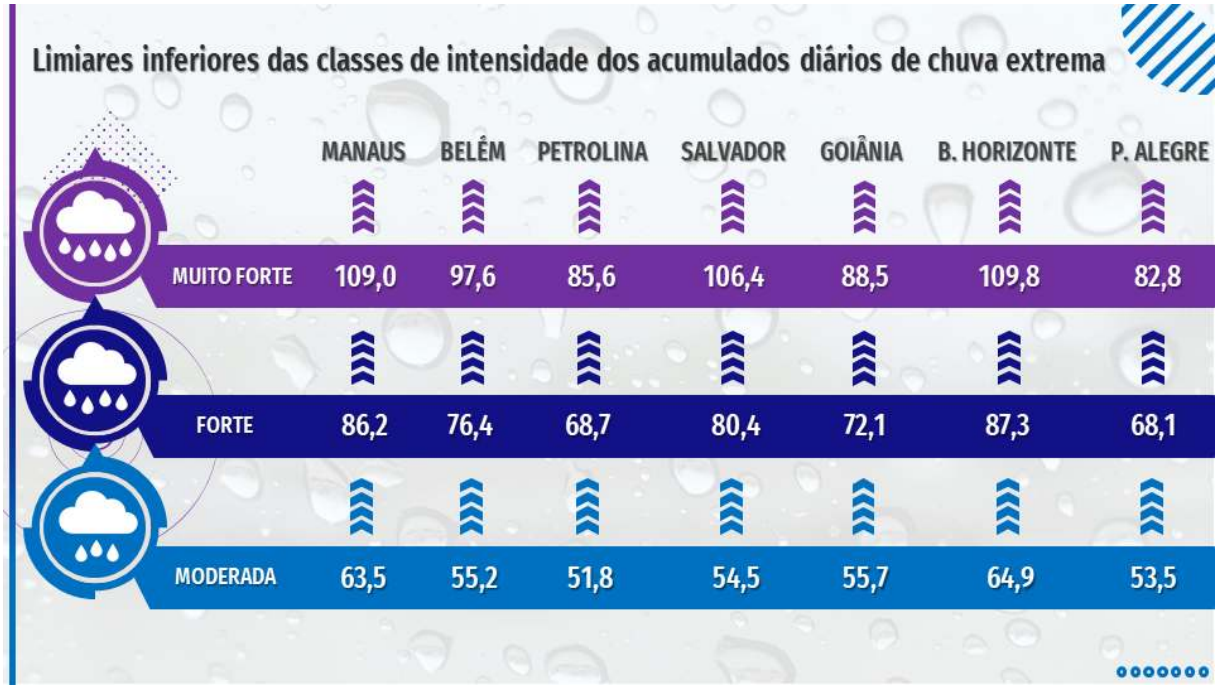
Em termos de maior ocorrência de dias com precipitação (ainda que sejam mantidos aqueles acumulados mínimos), o destaque fica para o posto pluviométrico localizado em Belém-PA, o qual registrou incríveis 7.991 dias com precipitação, seguido pelo posto de Salvador-BA, com 5.906 dias e Manaus-AM, que registrou 5.337 dias com precipitação. Na sequência, o posto pluviométrico localizado em Porto Alegre-RS registrou 4.310 dias com precipitação, enquanto que em Goiânia-GO foram registrados 4.044 dias com precipitação. Em Belo-Horizonte observaram-se 3.191 dias com precipitação registrada.

No entanto, ao analisar o posto pluviométrico localizado no semiárido nordestino, em Petrolina-PE, o cenário é bem diferente, registrando precipitação em apenas 1.388 dias, mesmo considerando uma longa série histórica (1992-2021). Em um primeiro momento, tal registro foi recebido com certa preocupação, uma vez que havia, hipoteticamente, receio de que a pequena quantidade de dias registrados com precipitação ou, até mesmo, volumes de menor expressão (que podem ser mais recorrentes no semiárido), interferissem nos limiares das classes de precipitação extrema, caso estes não fossem tão extremos assim, de acordo a literatura científica.

Contudo, os resultados obtidos evidenciam que, independentemente da quantidade de dias registrados com precipitação e o volume destes acumulados, a adoção de um quantil extremo, geralmente o Q (0,95) ou, em casos excepcionais e sob avaliação do pesquisador pode-se considerar o Q (0,99), além da utilização da mediana (ao invés da média), bem como do desvio padrão na metodologia, parecem superar tal problemática, a ponto de definir operacionalmente intervalos para as classes que são condizentes com as concepções teóricas propaladas em diversos estudos científicos.

Após aplicar a Metodologia Estatística dos Eventos Extremos de Precipitação (M3EP), foram obtidos os limiares para cada classe de extremos de chuva diária (Figura 4), considerando uma série histórica de 30 anos de observação (1992-2021) nas 7 localidades selecionadas, a fim de exemplificar e avaliar a utilização da metodologia autoral.

Figura 4 – Limiares inferiores das classes de intensidade de precipitação diária extrema, considerando as localidades em análise



Fonte: Elaborado pelos autores (2022)

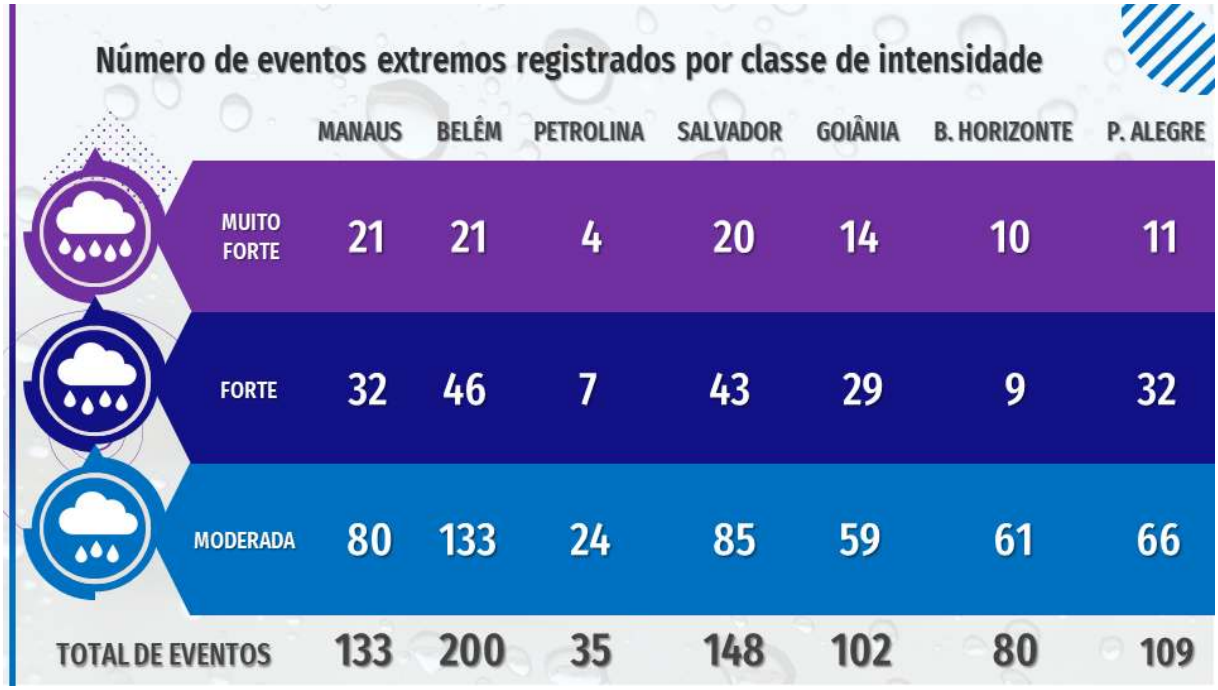
Aqui, nota-se como os limiares das classes de chuva extrema são coerentes com a operacionalização do conceito. Basta observar, comparativamente, os limiares de localidades com comportamentos de precipitação bem distintos (como Belém-PA e Petrolina-PE), os quais não são tão "distantes" entre si (considerando os intervalos em milímetros).

Entre as localidades selecionadas para aplicação da metodologia estatística, os limiares mais expressivos das classes de chuva extrema, em termos de acumulados diários registrados, são verificados nas localidades Belo Horizonte-MG, Manaus-AM e Salvador-BA, respectivamente. Nestas localidades, os limiares inferiores da classe de chuva extrema muito forte, por exemplo, chegam a ultrapassar os 100 milímetros precipitados em 24 horas.

Contudo, um outro ponto muito satisfatório observado a partir da utilização da Metodologia Estatística dos Eventos Extremos de Precipitação (M3EP) diz respeito à análise da recorrência dos extremos de precipitação, considerando a intensidade dos mesmos. Ao se observar o número de registros por classe de precipitação extrema (Figura 5) na longa série histórica em análise (1992-2021), evidencia-se claramente que o resultado condiz com o comportamento de chuva em cada localidade, o que também se apresenta como um

importante elemento de análise que valida a utilização da metodologia na definição e registros de episódios diários de chuva extrema.

Figura 5 – Quantidade de eventos extremos de chuva diária registrados em cada localidade, por classe de intensidade



Fonte: Elaborado pelos autores (2022)

Conforme esperado, o posto pluviométrico localizado em Belém-PA (região de clima mais úmido) apresentou um registro expressivo de eventos extremos diários de precipitação, contabilizando 200 eventos, sendo 133 eventos de chuva moderada, 46 eventos de chuva forte e 21 eventos de chuva muito forte. Manaus-AM também registrou 21 eventos de chuva muito forte, porém um menor quantitativo de eventos de chuva forte e moderada, evidenciando como Belém registra, com maior recorrência, eventos nestas duas classes.

Com comportamento de chuva bem distinto, o posto localizado em Petrolina-PE (em região mais seca, influenciada pelo clima semiárido) registrou apenas 35 eventos extremos durante a série histórica analisada, sendo 24 destes de chuva moderada, 7 de chuva forte e outros 4 de chuva muito forte, evidenciando assim como eventos desta natureza são muito raros, de aparição extraordinária nesta localidade.

A categorização utilizada a partir da Metodologia Estatística dos Eventos Extremos de Precipitação (M3EP) para identificação/classificação de determinados eventos caracterizados

como extremos também permite uma importante análise associada à crise climática atravessada atualmente, principalmente quando se observa a recorrência e intensidade destes eventos extremos nas últimas décadas, problemática constantemente abordada por inúmeros cientistas, em especial aqueles ligados ao Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC), os quais alertam para uma maior recorrência e intensidade de eventos desta natureza nas próximas décadas.

Curiosamente, ao se avaliar nas três últimas décadas (considerando a série histórica em análise) a recorrência e intensidade de tais eventos nas localidades selecionadas para aplicação da metodologia, um dado chama atenção: observou-se um aumento gradual de registros de chuva extrema na categoria muito forte (Tabela 1), com 27 registros na primeira década (1992-2001), 30 registros na segunda década (2002-2011) e incríveis 44 registros nesta última década (2012-2021), a qual obteve grande destaque.

Tabela 1 – Número de eventos extremos registrados na categoria muito forte, por década, nos últimos 30 anos, considerando as localidades em análise.

Localização do posto pluviométrico	Registros na Categoria Muito Forte (Década de 1992-2001)	Registros na Categoria Muito Forte (Década de 2002-2011)	Registros na Categoria Muito Forte (Década de 2012-2021)	Total de Eventos Extremos na Categoria Muito Forte
Manaus-AM	3	5	13	21
Belém-PA	8	7	6	21
Petrolina-PE	1	2	1	4
Salvador-BA	6	8	6	20
Goiânia-GO	4	5	5	14
Belo Horizonte-MG	4	1	5	10
Porto Alegre-RS	1	2	8	11
Total	**27**	**30**	**44**	**101**

Fonte: Elaborado pelos autores (2022)

Seria mera coincidência? Ou uma evidência do contexto de crise climática que atravessamos? Embora tal incremento não esteja necessariamente atrelado à emergência climática vivenciada atualmente (tal estudo seria envolto de maior complexidade e análises

mais pontuais), em que muitos pesquisadores alertam para um aumento da frequência e intensidade de eventos extremos de precipitação, tal dado é, no mínimo, motivo de grande alerta para muitas localidades brasileiras que necessitam de estudos com maior aprofundamento nesta perspectiva.

Ora, se estes eventos ocorrem, em especial, nas cidades brasileiras que cresceram nas últimas décadas de forma desordenada, sem o devido planejamento urbano e onde figuram inúmeros problemas de natureza social e ambiental, tais eventos incrementariam ainda mais os impactos provenientes de desastres hidrometeorológicos, tornando-os mais recorrentes e intensos.

De qualquer forma, quando confrontados tais registros de chuva extrema das localidades selecionadas com as análises e estudos recentes divulgados pelo Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas (PBMC), é possível até mesmo encontrar certa relação. A partir de modelos, tais estudos alertam, em termos de projeções, para uma diminuição na frequência de chuvas e aumento do número de dias secos consecutivos na porção semiárida do Nordeste brasileiro, representando um déficit de precipitação que pode chegar a 50% em algumas localidades até 2100, enquanto que no extremo sul do país aponta-se para um aumento do volume precipitado nas próximas décadas, podendo apresentar um incremento de até 40% nos acumulados até 2100 (AMBRIZZI, ARAÚJO, 2020).

Os registros observados em Petrolina-PE, por exemplo, estariam alinhados com tais projeções, quando observamos os registros de chuva na categoria muito forte. Os poucos registros de chuva muito forte nas três últimas décadas (apenas 4 eventos) em Petrolina-PE, inclusive com um único registro na última década (2012-2021), parecem concordar com a projeção de 2011-2040 observada no último Relatório do Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas (PBMC). Vale salientar, inclusive, que nesta mesma década o semiárido brasileiro também apresentou anos consecutivos de seca severa, em especial entre os anos de 2012-2017.

Também concordando com as Projeções do Relatório do Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas (PBMC) para o período 2011-2040, os registros de Porto Alegre se destacam por sua recorrência e magnitude, quando observamos a série histórica analisada (1992-2021). Oito dos onze eventos extremos de categoria muito forte foram registrados nesta última década

(2012-2021), evidenciando como a frequência e intensidade destes eventos estariam aumentando.

Claro que tal correlação ainda é prematura, uma vez que há necessidade de estudos com maior especificidade, analisando com maior profundidade a variabilidade climática e, até mesmo teleconexões oceano-atmosfera e os respectivos efeitos de retroalimentação ainda desconhecidos neste complexo sistema climático, os quais podem oferecer evidências das mudanças climáticas, inclusive a nível regional.

Contudo, não cabe aqui realizar tal prospecção e avaliação. Apenas evidencia-se a possibilidade de uso da Metodologia Estatística dos Eventos Extremos de Precipitação (M3EP) como suporte na análise, no intuito de identificar e categorizar eventos considerados extremos a partir de longas séries históricas. Os resultados obtidos a partir da aplicação da metodologia permitiram, ao menos, levantar problemas de pesquisa que carecem de investigação, algo que não se esgota aqui.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O emprego da Metodologia Estatística dos Eventos Extremos de Precipitação (M3EP) permitiu resolucionar/contornar ao menos duas importantes problemáticas verificadas a partir da utilização de outras metodologias estatísticas que já são difundidas na comunidade científica para definição de limiares de eventos extremos de precipitação diária.

A primeira diz respeito a menor quantidade de registros diários de precipitação verificados (característica que pode ser recorrente em localidades situadas no semiárido, por exemplo), além dos muitos registros de acumulados diários com pequena expressão que, quando incorporados em algumas metodologias estatísticas, acabavam por resultar em limiares de precipitação caracterizados como extremos que seriam questionáveis, uma vez que estes poderiam não apresentar valores tão elevados, não condizendo assim com as concepções teóricas verificadas em diversos estudos científicos.

Para contornar essa problemática, por vezes criou-se uma outra alternativa passível de questionamento, resultando em novo problema: propor um limiar, de forma subjetiva, para definir aqueles eventos que seriam categorizados como extremos. Ora, tal procedimento ignora o comportamento da precipitação numa dada localidade, uma vez que este é distinto

em cada região analisada. Em localidades com chuvas escassas, por exemplo, o "normal" é verificar muitos dias sem precipitação e/ou com acumulados inexpressivos. Tais acumulados não devem ser considerados? Isso representa um equívoco, propositalmente executado para que os resultados ofereçam limiares de precipitação diária extrema condizentes com as concepções teóricas, oferecendo assim resultados com valores mais expressivos.

Em sua essência, a Metodologia Estatística dos Eventos Extremos de Precipitação (M3EP) não ignora o comportamento da chuva numa dada localidade, uma vez que só se excluem do cálculo os dias em que não se verificam acumulados de precipitação, ou seja, todos os registros diários de precipitação, mesmo que irrisórios, são considerados ainda no primeiro cálculo realizado, quando se estabelece o quantil extremo, geralmente Q(0,95) ou Q(0,99), definido a partir dos critérios de cada pesquisador.

Assim, de forma coerente, esta metodologia não exclui todos os acumulados abaixo de um limiar estabelecido subjetivamente. Tampouco se utiliza de uma classe normal, visto que, do ponto de vista estatístico, não seria coerente estabelecer uma categoria normal para episódios que não ocorrem com certa frequência.

Os resultados obtidos com a utilização desta metodologia, a partir da seleção de postos pluviométricos em localidades e contextos distintos, permitiram validar e avaliar a eficácia da mesma, representando assim uma boa alternativa para definir limiares de precipitação diária caracterizados como extremos, inclusive categorizando-os.

Isso não significa que tal metodologia tenha superado aquelas já amplamente difundidas e aceitas na comunidade científica, ou que esta não possua limitações. Ela apresenta-se apenas como mais uma alternativa que surge inspirada em outras metodologias estatísticas (inclusive utilizando em sua fórmula uma destas técnicas estatísticas), fruto das experiências pessoais e profissionais de pesquisadores envolvidos na temática.

Assim, tal metodologia é aqui apresentada como possibilidade, ou até mesmo um primeiro passo para fomentar outros estudos, que incluem desde uma avaliação da recorrência e intensidade de eventos extremos de precipitação em um contexto de crise climática que atravessamos, até uma análise pormenorizada da influência/atuação de sistemas meteorológicos e teleconexões que explicariam acumulados tão vultosos, o que não foi o objetivo da proposta aqui apresentada.

REFERÊNCIAS

AMBRIZZI, Tercio; ARAÚJO, Moacyr (org). **Base científica das mudanças climáticas**: Relatório Especial do Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas. Rio de Janeiro: PBMC Coppe – UFRJ, 2020. 111p.

CONTI, José Bueno. **Clima e meio ambiente**. 7ª ed. São Paulo: Atual, 2011. 96 p.

FRICH, P.; ALEXANDER, L. V.; DELLA-MARTA, P.; GLEASON, B.; HAYLOCK, M.; KLEIN-TANK, A. M. G.; PETTERSON, T. Observed coherent changes in climatic extremes during the second half of the twentieth century. **Climate Research.** Norwich, v.19, p 193-212, 2002.

GAO, Xuejie.; JEREMY S. Pal; FILIPPO Giorgi. Projected changes in mean and extreme precipitation over the Mediterranean region from a high resolution Double nested RCM simulation. **Geophysical Research Letters**, Washington, v.33, p. 1-4, 2006.

GOODIN, D.; BRAZEL, T.; FOUNTAIN, A.; HADLEY, J.; JUDAY, G.; KLOEPPEL, B.; KNAPP, A.; LOSLEBEN, M.; SMITH, M. LTER Extreme Events Working Group. In: WORKSHOP HELP, 2004, Portland. **Anals**... 2004.

GOUDARD, Gabriela; MENDONÇA, Francisco de Assis. Eventos Pluviais Extremos em Curitiba (Paraná): Entre antigos problemas e novos desafios. In: PEREZ FILHO, A.; AMORIM, R. R. (org). **Os desafios da Geografia Física na fronteira do conhecimento**. Campinas, SP: Instituto de Geociências - UNICAMP, 2017, p. 1919-1930.

HERRMANN, Maria Lúcia de Paula. As contribuições do GEDN, e do LabClima, nas análises dos desastres socionaturais em Santa Catarina. **Cadernos Geográficos**, Santa Catarina, n.36, p.20-26, 2016.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **Gestión de los riesgos de fenómenos meteorológicos extremos y desastres para mejorar la adaptación al cambio climático**: Resumen para responsables de políticas. [S.I.]: Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático, 2012.

MACHADO, Jeferson Prietsch; MACHADO, Cristiane Ferrari Canez; SCHIEWALDT, Caio Brandão. Eventos Extremos de Precipitação no Município de Bauru-SP: Possibilidade de Ocorrências de Desastres Naturais? **Anuário do Instituto de Geociências – UFRJ**, Rio de Janeiro, v. 42, n.1, p. 255-266, 2019.

MARENGO, José A. Mudanças climáticas, condições meteorológicas extremas e eventos climáticos no Brasil. In: MARENGO, José A.; SCHAEFFER, Roberto; PINTO, Hilton Silveira; ZEE, David Man Wai. **Mudanças climáticas e eventos extremos no Brasil**. Rio de Janeiro: FBDS, 2009. p. 4-19.

MENDONÇA, Francisco de Assis. Riscos, vulnerabilidades e resiliência socioambientais urbanas: inovações na análise geográfica. **Revista da Anpege**, [S.I], v.7, n.1, número especial, p. 111-118, 2011.

MONTEIRO, Jander Barbosa. **Desastres Naturais no Estado do Ceará**: uma análise de episódios pluviométricos extremos. 2016. 256f. Tese (Doutorado em Geografia) – Programa de Pós-Graduação em Geografia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2016.

MONTEIRO, Jander Barbosa; ZANELLA, Maria Elisa. A metodologia dos máximos de precipitação aplicada ao estudo de eventos extremos diários nos municípios de Crato, Fortaleza e Sobral-CE. **GEOTEXTOS** (ONLINE), v. 13, p. 135-159, 2017.

MONTEIRO, Jander Barbosa; ZANELLA, Maria Elisa. Eventos Extremos no estado do Ceará, Brasil: uma análise estatística de episódios pluviométricos no mês de março de 2019. **GEOTEXTOS** (ONLINE), v. 15, p. 149-173, 2019.

PAZ, Cléo Maycon Viana; SANCHES, Fábio de Oliveira. Ocorrência de eventos extremos de precipitação em Uberaba (1959-2015) e sua relação com as mudanças climáticas. In: PEREZ FILHO, A.; AMORIM, R. R. (Org). **Os desafios da Geografia Física na fronteira do conhecimento**. Campinas, SP: Instituto de Geociências - UNICAMP, 2017, p. 2639-2642.

RIBEIRO, S. K., SANTOS, A.S. (org). **Mudanças Climáticas e Cidades**: Relatório Especial do Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas. Rio de Janeiro: PBMC Coppe – UFRJ, 2016. 116p.

SILVA, Cristiano Alves da. **Os desastres Pluviométricos nas Grandes e Médias Cidades do Paraná**. 2012. 144 f. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Programa de Pós Graduação em Geografia do Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2012.

ROOY, M.PV.A. **Rainfall anomaly index independente of time and space**. Notes. Weather Bureau of South Africa, v.14. 1965.

TEIXEIRA, Mateus da Silva. **Atividade de ondas sinópticas relacionada a episódios de chuvas intensas na região Sul do Brasil**. 2004. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) - São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), 2004. 121p.

XAVIER, Teresinha de Maria Bezerra Sampaio; XAVIER, Airton Fontenele Sampaio; ALVES, José Maria Brabo. **Quantis e eventos extremos**: aplicações em ciências da terra e ambientais. Fortaleza: RDS, 2007. 278 p.