

Identificação de eventos extremos de precipitação e desastres deflagrados por chuvas no município de Petrópolis-RJ

Identification of extreme rainfall events and disasters triggered by rain in the city of Petrópolis-RJ

Sara Carolina Soares Guerra Fardin ¹

Viviana Aguilar-Muñoz ²

Leonardo Freire Dias ³

Beatriz Justen Mussi Tanus e Bastos ⁴

Ana Paula Martins do Amaral Cunha ⁵

¹ Mestrado em Engenharia Florestal, Professora, Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia do Espírito Santo, Vitória, ES, Brasil
E-mail: scsguerra@gmail.com

² Doutorado em Sensoriamento Remoto, Pesquisadora, Cemaden, São José dos Campos, SP, Brasil
E-mail: viviana.munoz@cemaden.gov.br

³ Mestrado em Defesa e Segurança Civil, Consultor, Thalweg Consultoria e Projetos Geológicos, Niterói, RJ, Brasil
E-mail: leonardo.freire@unesp.br

⁴ Geógrafa, Mestranda, Universidade Federal Fluminense, Rio de Janeiro, RJ, Brasil
E-mail: beatrizbastos98@gmail.com

⁵ Doutorado em meteorologia, Professora, Cemaden, São José dos Campos, SP, Brasil
E-mail: vineana@gmail.com

doi:10.18472/SustDeb.v14n2.2023.49463

Received: 29/06/2023
Accepted: 10/08/2023

ARTICLE- VARIA

RESUMO

O município de Petrópolis-RJ, Brasil, está exposto a eventos extremos de precipitação, que resultam em danos e perdas econômicas diretas e indiretas. Para verificar o aumento ou não desses eventos, o objetivo foi avaliar o padrão temporal das chuvas no município (1976-2022), identificando se o evento ocorrido em 2022 pode ser considerado um evento extremo, bem como a relação entre pluviometria e intensidade do impacto, em termos dos danos e perdas deflagrados. Foram então calculados os acumulados de precipitação em 24 horas (RX1), em 5 dias (RX5), percentis 95 e 99 (R95 e R99), Índice de Anomalia de Chuvas (IAC) e análises de tendência pelo método Mann-Kendall, bem como dados

de perdas e danos. Os resultados não indicaram viés de aumento dos extremos de precipitação, embora tenha confirmado o evento ocorrido em fevereiro de 2022 como um evento extremo, o qual se configurou como o maior da série histórica analisada.

Palavras-chave: Extremos de precipitação. Petrópolis-RJ. Desastres relacionados à chuva. Ocorrência de desastres.

ABSTRACT

The municipality of Petrópolis-RJ, Brazil, is prone to extreme rainfall events that cause damage and direct and indirect economic losses. In order to verify the increase or not of these events, this study evaluates the temporal pattern of rainfall in the municipality (1976-2022), identifying whether the event that occurred in 2022 can be considered an extreme event, as well as the relationship between rainfall and impact intensity, in terms of damage and losses triggered. The accumulated rainfall over 24 hours (RX1), over 5 days (RX5), the 95th and 99th percentiles (R95 and R99), the Rainfall Anomaly Index (RAI) and trend analyses using the Mann-Kendall method, as well as loss and damage data were then calculated. The results did not indicate a trend towards an increase in precipitation extremes, although they did confirm the February 2022 event as an extreme event, which stood out as the largest within the historical series analysed.

Keywords: Precipitation extremes. Petrópolis-RJ. Rain-related disasters. Occurrence of disasters.

1 INTRODUÇÃO

Desde a década de 1990, são publicados relatórios do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC) acerca das alterações e expectativas relacionadas ao clima no planeta, entre elas mudanças significativas na magnitude e frequência de fenômenos meteorológicos extremos (IPCC, 2012, 2021). O último relatório indica também que houve aumento do impacto nos ecossistemas, pessoas e assentamentos em função das mudanças climáticas induzidas pelo homem (IPCC, 2022).

Para compreender os danos associados a eventos extremos meteorológicos, primeiro é necessário reconhecer esses eventos. A Organização Meteorológica Mundial (WMO) os define como eventos meteorológicos que se desviam significativamente das condições médias, levando em consideração uma série histórica de, no mínimo, 20 anos, e o potencial de causar perigos ou impactos significativos nas atividades humanas e no meio ambiente (IPCC, 2022).

Em função das vulnerabilidades presentes no território e da predisposição dos elementos expostos a sofrer perdas e danos, os eventos meteorológicos extremos podem deflagrar desastres de maior ou menor severidade (COUTINHO *et al.*, 2020; DEBORTOLI *et al.*, 2017; IPCC, 2012; LAHSEN; RIBOT, 2020).

Nas regiões tropicais, existem evidências de que esteja ocorrendo um aumento da frequência e intensidade das chuvas extremas, com o desdobramento de diversos impactos gerados por elas, que são potencializados pela baixa capacidade de adaptação dos países em desenvolvimento (PRABHAKAR *et al.*, 2009).

No Brasil grande parte das ocorrências de desastres é causada por fenômenos deflagrados por chuvas, por exemplo, enxurradas, inundações e movimentos de massa úmida (PAINEL BRASILEIRO DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS, 2014). Se considerarmos o aumento dos valores médios da temperatura do ar decorrente das mudanças climáticas – cenário previsto para diversas regiões do país –, aumenta a expectativa de que ocorram cada vez mais eventos de chuva extrema e, com isso, também aumenta a probabilidade de ocorrência de desastres. Para verificar essa hipótese e desenvolver estratégias de adaptação para o país, é fundamental monitorar a ocorrência de eventos extremos no território.

A região serrana do estado do Rio de Janeiro é um exemplo de cidade com efeito cascata gerado por precipitações intensas. Em janeiro de 2011, ocorreu um desastre que ocasionou danos e perdas em pelo menos sete municípios, incluindo o município de Petrópolis, vitimando aproximadamente 947 pessoas (DOURADO *et al.*, 2012).

Petrópolis é afetada recorrentemente por chuvas intensas, e possui registros de desastres datados de 1950 (ASSUMPÇÃO, 2015). Mais recentemente, entre janeiro e março de 2022, ocorreram três episódios de chuvas intensas associados a Tempestade Local Convectiva que deflagraram impactos severos sobre a população. O mais grave foi em 15 de fevereiro, que resultou na morte de ao menos 234 pessoas (ALCÂNTARA *et al.*, 2022; GRUBERTT, 2022).

Diante dessas cifras assustadoras, surgem questionamentos acerca do que poderia ser feito para reduzir o risco de desastres provocados por chuvas nessa região e, considerando que o conhecimento do risco é um dos quatro pilares fundamentais para a redução do risco de desastres, o objetivo deste trabalho foi analisar o padrão temporal dos eventos extremos de chuvas (Ameaça), identificando se, de fato, o evento ocorrido em 2022 pode ser considerado um evento extremo, bem como a relação entre pluviometria e intensidade do impacto, em termos dos danos e perdas deflagrados no município.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 ÁREA DE ESTUDO

O município de Petrópolis está localizado nas coordenadas 22°30'17" de latitude Sul e 43°10'42" de longitude Oeste, na região serrana do estado do Rio de Janeiro. Segundo o Serviço Geológico do Estado do Rio de Janeiro, na Carta Geotécnica de Aptidão Urbana, a somatória de áreas com moderada e alta susceptibilidade a movimentos de massa corresponde a 64,06% do município.

De acordo com dados de 2022, há em Petrópolis uma população estimada de 278.881 habitantes; e densidade demográfica de 352,50 hab./km² (IBGE, 2022). O município apresentou um crescimento de quatro vezes em 80 anos, passando de 75,4 mil habitantes, em 1940, para 278.881 habitantes, em 2022 (IBGE, 1940, 2022).

A população de Petrópolis do Censo de 2010 (último disponível à data desta publicação) era de 295.917 pessoas, das quais 72.070 (isto é, 24,35%) residiam em áreas de risco, distribuídas em 22.298 domicílios (CEMADEN; IBGE, 2018). Apesar disso, o município contava com um Índice de Desenvolvimento Humano Municipal (IDHM) de 0,745 (IBGE, 2010), o qual é considerado alto e dentro da média para o Brasil cujo IDH nacional estava em 0,727. Segundo a prefeitura de Petrópolis, hoje, e apesar dos eventos adversos enfrentados nesse município na última década, esse índice cresceu, chegando a 0,804, enquanto o do Brasil baixou para 0,724.

2.2 DADOS

Os dados pluviométricos utilizados neste trabalho provêm da estação de medição automática Xerém, pertencente à rede Inmet, localizada em Duque de Caxias (-43° 30' 14.004" S, 22° 55' 33.996" W). Essa estação é a mais próxima da área de estudo (aproximadamente 15 km) e conta com a maior série histórica. De forma complementar, também foram utilizados dados de precipitação da estação São Sebastião, pertencente à rede do Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais (Cemaden), localizada no município de Petrópolis.

O período de análise deste estudo foi estabelecido entre 1976 e 2022, devido à disponibilidade da maior quantidade de dados nesse intervalo. Embora seja um período longo, é importante ressaltar que os dados das estações meteorológicas apresentam algumas falhas, as quais foram corrigidas por meio da utilização de valores médios de chuva interpolados a partir dos dados do Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station data – Chirps (FUNK *et al.*, 2015) e do Produto Merge do Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (ROZANTE *et al.*, 2010). Esses conjuntos de dados de chuva possuem uma resolução espacial aproximada de 5 km e 10 km, respectivamente.

Metodologia similar foi desenvolvida por Costa *et al.* (2019), que se propôs validar dados de precipitação no Brasil utilizando dados do Chirps. Costa identificou compatibilidade de 95,4% entre os dados do Inmet e os do Chirps, o qual legitima o uso desses dados para completar as falhas da série histórica selecionada para este estudo. Assim, a partir de dados de precipitação das estações meteorológicas de Xerém e de São Sebastião e complementados pelos dados do Chirps e Merge, foi construída uma série temporal de dados diários de precipitação do período de 1976 a 2022.

2.3 METODOLOGIA

2.3.1 ÍNDICES CLIMÁTICOS

Os índices calculados para auxiliar na compreensão do padrão temporal da precipitação no município de Petrópolis e identificar os valores extremos foram:

- Pt - Precipitação total anual
- Pmed - Precipitação média anual
- Ptri - Somatório da média móvel trimestral
- R95 - Número de dias em que a precipitação diária foi maior do que 95% das precipitações do período
- R99 - Número de dias em que a precipitação diária foi maior do que 99% das precipitações do período
- RX1 - Máximo valor anual em um dia de precipitação
- RX5 - Máximo valor de precipitação em cinco dias consecutivos

2.3.2 ÍNDICE DE ANOMALIA DE CHUVAS

Além dos índices apresentados, também foi calculado o Índice de Anomalia de Chuvas (IAC), que considera a média das dez maiores chuvas ocorridas dentro do período de análise, bem como a média das dez menores, sendo as anomalias positivas aquelas acima da média e as anomalias negativas aquelas abaixo da média. O IAC é classificado em termos de períodos secos e úmidos, como proposto por Rooy (1965) e adaptado por Freitas (2005). As anomalias podem ser expressas da seguinte forma:

Anomalias positivas

$$IAC = 3 \left[\frac{(N - \underline{N})}{(\underline{M} - \underline{N})} \right]$$

Anomalias negativas

$$IAC = -3 \left[\frac{(N - \underline{N})}{(\underline{X} - \underline{N})} \right]$$

Em que N é a precipitação mensal, \bar{N} é a média da série, \bar{M} é a média das dez maiores precipitações e \bar{X} é a média das dez menores precipitações. Ainda de acordo com o índice, a classificação da pluviosidade varia de extremamente chuvoso a extremamente seco.

2.3.3 TESTE DE MANN-KENDALL

O teste de Mann-Kendall (KENDALL, 1975; MANN, 1945) é um teste não paramétrico sugerido pela Organização Meteorológica Mundial (OMM) para verificar se as séries apresentam tendências temporais estatisticamente significativa, e tem sido utilizado com bastante eficiência. Assim, para que a tendência seja confirmada, o valor p-valor precisa ser inferior a 0,05%, representando uma confiança de 95%.

Assim, o teste foi aplicado visando identificar possíveis tendências no padrão temporal da precipitação anual e nos índices RX1, RX5 e IAC.

2.3.4 METODOLOGIAS UTILIZADAS PARA CÁLCULOS DE PERDAS E DANOS

Após a análise da ameaça de eventos extremos de chuvas, foram realizadas análises dos danos e perdas causados por desastres relacionados à chuva no município de Petrópolis. Essas análises foram baseadas em dados provenientes do Sistema Integrado de Informações sobre Desastres (S2iD), o qual incorpora diversos produtos da Secretaria Nacional de Proteção e Defesa Civil – Sedec (BRASIL, 2022). A série histórica utilizada corresponde ao período de dados disponível para Petrópolis, isto é, 2001 – 2022. As tipologias utilizadas na classificação de desastres nesta base de dados seguem a Codificação Brasileira de Desastres – Cobrade.

No S2iD os dados sobre impacto estão agrupados em quatro categorias: danos humanos (DH), danos materiais (DM), prejuízos públicos (PEPL) e prejuízos privados (PEPR), as mesmas utilizadas na presente análise. Os valores referentes a DM, PEPL e PEPR receberam correção monetária com referência a dezembro de 2022 e foram sintetizados em uma única variável que representa o total de danos e perdas (D&L: *damage and losses* em inglês), transformados a dólares americanos.

Um resumo das etapas metodológicas desenvolvidas pode ser observado na Figura 1.



Figura 1 | Infográfico com as etapas metodológicas

Fonte: Elaboração própria.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 ANÁLISE DO PADRÃO TEMPORAL DOS EVENTOS EXTREMOS DE CHUVAS

No período de 1976 a 2022, a chuva média mensal se manteve mais ou menos constante em torno da média mensal multianual (Figura 2), numa faixa de desvio padrão de 77 mm, com exceção dos anos de 1999, com um extremo negativo de 5,5 mm (uma vez menor do que a média), e de 2022, com um extremo positivo de 358,6 (três vezes a média).

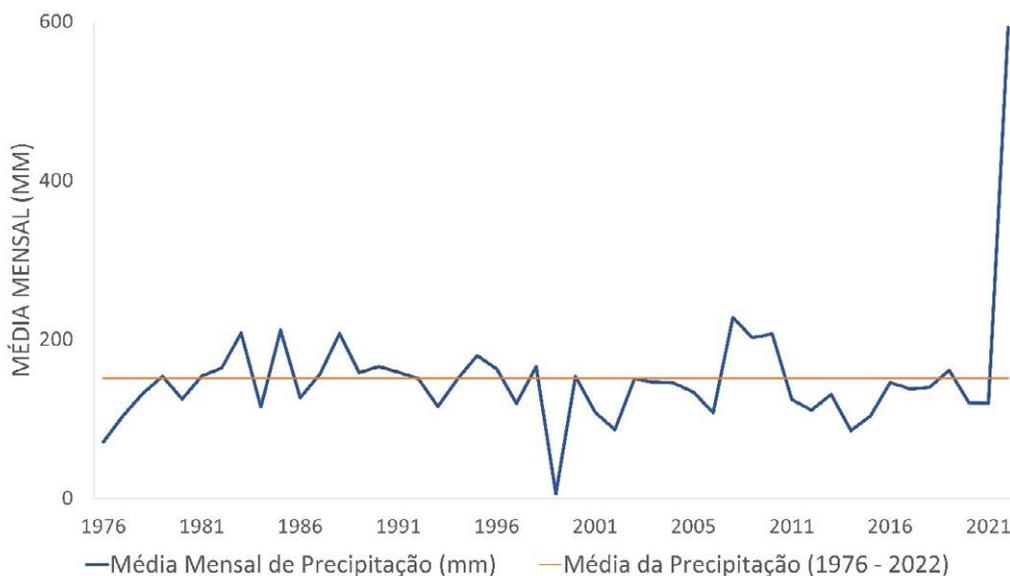


Figura 2 | Acumulado médio mensal e média mensal multianual de precipitação em Petrópolis

Fonte: Elaboração própria.

Os resultados do teste de Mann-Kendall indicaram uma tendência de redução no volume de chuvas ao longo do período, porém não apresentou significância estatística. Esse resultado corrobora a análise realizada por Silva *et al.* (2023) que, ao analisarem a tendência climática de Petrópolis, não encontraram a presença de tendência pelos testes de Ljung-Box e Mann-Kendall, e diverge das análises de Oscar-Júnior (2021) que indica que existe uma tendência estatisticamente significativa de aumento de pluviometria mensal em Petrópolis, embora os autores tenham utilizado diferentes séries temporais.

A concentração de chuva em determinados períodos do ano também foi avaliada para a série. A análise de médias móveis de precipitação trimestral indicou que o trimestre novembro – dezembro – janeiro teve a maior média mensal de chuvas, seguido pelo trimestre dezembro – janeiro – fevereiro, antecedendo a estação chuvosa. Foi nessa estação que ocorreram os dois eventos com maior número de vítimas: 11 de janeiro de 2011 e 15 de fevereiro de 2022. De acordo com Silva *et al.* (2020), o acúmulo de chuvas entre os meses de outubro e março ocorre em função do sistema meteorológico Zona de Convergência do Atlântico Sul, que atua fortemente na região, gerando tempestades locais.

Embora não sejam conclusivos acerca da motivação dos eventos, esses resultados indicam que as ações de prevenção e preparação da resposta a eventuais eventos extremos de precipitação devem anteceder o início da estação chuvosa na região, além de necessitarem de maior foco em ações de médio e longo prazo. Beck (2023) aponta que já existem ações nesse sentido em desenvolvimento no município, como um estudo para a criação de barreiras para contenção de movimentos de massa e o Plano Municipal de Redução de Risco, ambos como parte de um plano para tornar a cidade mais resiliente.

Embora os eventos extremos tenham características únicas, eles podem fazer parte de eventos regionais ou ainda ser desencadeados em função de características específicas do local, assim, é preciso ter um diagnóstico consolidado da área que permita a realização de ações efetivas em prol da resiliência, e que envolvam não apenas análises pluviométricas. Nesse sentido, Alcântara *et al.* (2023) indicam que outros fatores, como a remoção de vegetação nativa, o crescimento populacional em áreas com declividade entre 45o-60º e a falta de planejamento urbano são fatores que contribuem significativamente para a ocorrência de desastres no município.

Ainda com relação à análise dos dados de precipitação, os extremos de chuvas também foram avaliados por meio do índice RX1, que retorna os valores máximos de precipitação em 24 horas para cada ano (Figura 3). O maior volume de chuva de toda a série temporal ocorreu no dia 21 de março de 2022, com um total de 358,6 mm, seguido pelo dia 12 de fevereiro de 1998, com um total de 301,4 mm. O teste de Mann-Kendall não apresentou tendência significativa de alteração no valor máximo de chuva..

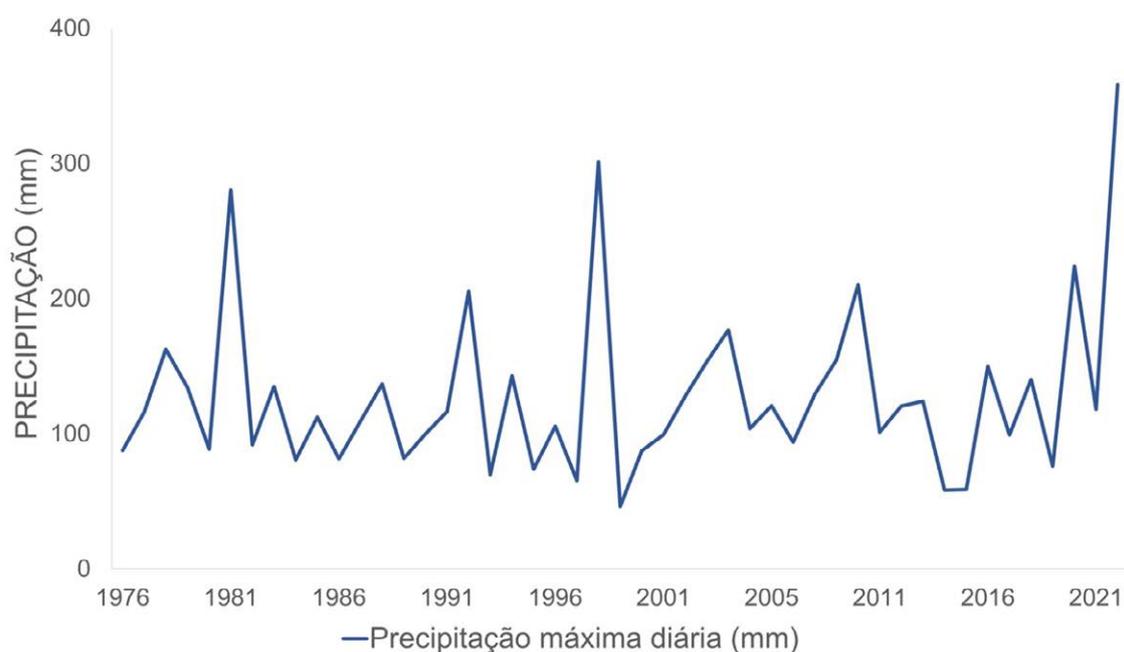


Figura 3 | Evolução temporal do índice RX1 para o município de Petrópolis

Fonte: Elaboração própria.

Cabe ressaltar que, em relação aos dados diários, o pluviômetro instalado pelo Cemaden no bairro São Sebastião, principal bairro afetado pelas chuvas de 2022, registrou 260 mm de precipitação acumulados em duas horas e meia em 15 de fevereiro de 2022, e 476,8 mm acumulados em 24 horas entre os dias 20 e 21 de março, já o pluviômetro do bairro Quitandinha, a cerca de 3 km de distância, marcou 200 mm, indicando que o evento pode ter sido extremamente concentrado. Infelizmente, em função do reduzido número de pluviômetros no município, incluindo uma série histórica dos eventos, não é possível confirmar se essa concentração de fato existiu ou ainda se é recorrente, como indicam os dados. Apesar disso, seguindo nessa linha, Oscar-Júnior (2021) indicou uma tendência de redução do número de dias chuvosos com um aumento da concentração das chuvas em eventos diários ou de até cinco dias consecutivos para o município.

Com relação ao volume máximo de chuva acumulado em cinco dias (RX5), não foi possível constatar tendência de aumento do número de dias chuvosos pelo teste de Mann-Kendall. Ao analisar o percentil 95 da série histórica, observam-se em média 17 dias de chuva por ano acima da média da série (Figura 4).

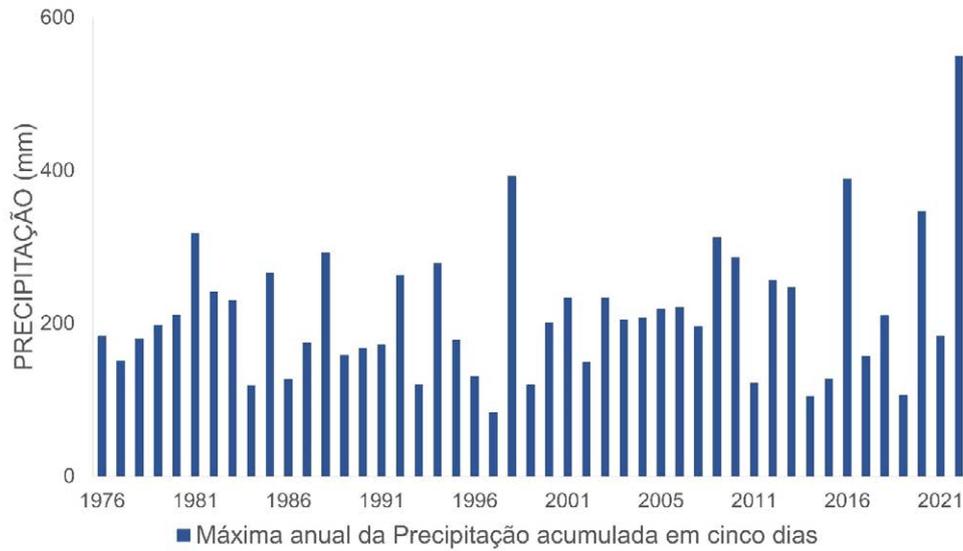


Figura 4 | Distribuição temporal (anual) do índice RX5 no município de Petrópolis

Fonte: Elaboração própria.

O percentil 95 para os valores máximos de acumulados de chuva em cinco dias (RX5) apresenta o valor de 376,1 mm, e o percentil 99 mostra 477,07 mm, ambos abaixo do valor de chuva acumulada em cinco dias em 2022, o qual em apenas um dia a precipitação foi de 358,6 mm. Esse resultado confirma a excepcionalidade do evento ocorrido em fevereiro de 2022, o que possibilita seu enquadramento como um evento extremo.

Ainda visando a compreensão da dinâmica da distribuição pluviométrica, o Índice de Anomalia de Chuvas (IAC) calculado apontou 26 anos extremamente chuvosos, muito chuvosos ou chuvosos, assim como 26 anos secos e dois muito secos (Figura 5), embora não tenha sido possível correlacionar se os anos com maiores anomalias positivas resultaram em um maior número de vítimas ou ainda qualquer tendência (pelo teste de Mann-Kendall) de que o número de anomalias positivas ou negativas esteja aumentando, foi possível observar que o ano de 2022 teve a maior anomalia positiva do período, confirmando ainda mais a excepcionalidade do evento.

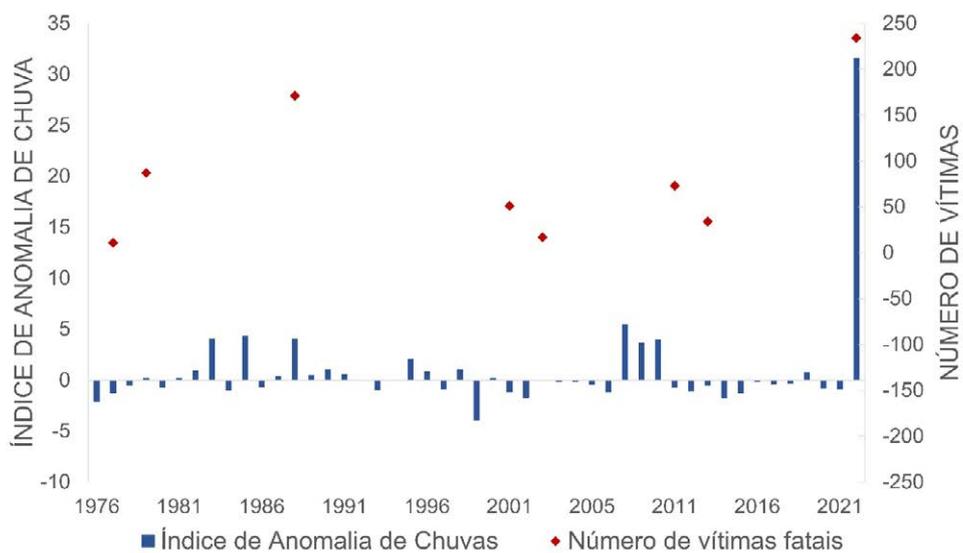


Figura 5 | Índice de Anomalia Climática (IAC) e anos com vítimas fatais no município de Petrópolis

Fonte: Elaboração própria.

A ocorrência de anomalias pode estar associada à presença de outros eventos meteorológicos, como a Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) ou ainda Sistemas Frontais, que potencializam a pluviometria, ocasionando a cheia de rios, facilitando a ocorrência de deslizamentos e movimentos de massa e, conseqüentemente, a perda de vidas (SILVA *et al.*, 2020), eventos recorrentes no município de Petrópolis. No caso específico do evento ocorrido em 2022, Alcântara *et al.* (2023) indicam que a ZCAS estava posicionada sobre o estado do Rio de Janeiro, favorecendo a convecção atmosférica e conseqüente instabilidade meteorológica.

Os dados apresentados ao longo do trabalho corroboram estudos que indicam que essa região tem passado por uma alteração no cenário climático que, embora não afete significativamente a quantidade de chuva total anual, altera a distribuição, levando a um aumento da probabilidade de ocorrência de eventos extremos de precipitação, mais especificamente aumento dos casos de grandes volumes de chuva em um tempo muito curto (OSCAR JÚNIOR, 2021; SILVA *et al.*, 2020; SILVA *et al.*, 2023).

Com a presente análise não foi possível correlacionar se o acumulado de chuvas teve influência no número de vítimas fatais, levando em consideração que a suscetibilidade é a somatória de diversos parâmetros e que Petrópolis apresenta um cenário de multiperigos, embora seja possível afirmar que as mortes ocorreram em decorrência dos eventos pluviométricos. Para realizar essa correlação, seria necessário aprofundar as análises e incluir outros fatores, como declividade e uso e ocupação do solo. Nesse sentido, Alcântara *et al.* (2023) afirmam que as taxas e a forma como a urbanização ocorreu em Petrópolis superam as características climáticas como indutores de deslizamentos e, conseqüentemente, desastres, uma vez que a maior parte das construções está localizada em áreas com declividade superior a 20%.

A urbanização afeta e é afetada diretamente pela concentração do volume de chuvas, influenciando na definição de locais propícios à moradia, por exemplo. Por conseqüência, gera preocupação em relação à capacidade do município em responder à alta concentração de chuva em um curto período.

Embora a Prefeitura Municipal de Petrópolis tenha implementado ações como o Sistema de Alerta e Alarme, de acordo com o Plano Municipal de Redução de Risco, não foram realizadas intervenções físicas no sentido de melhorar o escoamento de água durante os eventos chuvosos (PREFEITURA MUNICIPAL DE PETRÓPOLIS, 2017), o que potencializa o efeito negativo das chuvas.

3.2 ANÁLISE DE DANOS E PERDAS ASSOCIADOS À CHUVA

Com base na série histórica de ocorrência de desastres referentes ao município de Petrópolis, período 2001 – 2022, observa-se que as tipologias de ameaças com maior número de ocorrências são deslizamentos de solo/ou rocha, enxurradas e chuvas intensas. A distribuição desses eventos ocorreu entre os meses de outubro (início da estação chuvosa) e abril (fim da estação chuvosa), coincidindo com os meses que retornaram maiores índices pluviométricos na análise (Figura 6). Os dados corroboram um estudo realizado por Torres *et al.* (2020), que indica que o número de deslizamentos tem apresentado uma tendência crescente no município de Petrópolis, estando diretamente relacionados com altos valores de precipitação, principalmente quando os acumulados passam de 48h ou 72h.

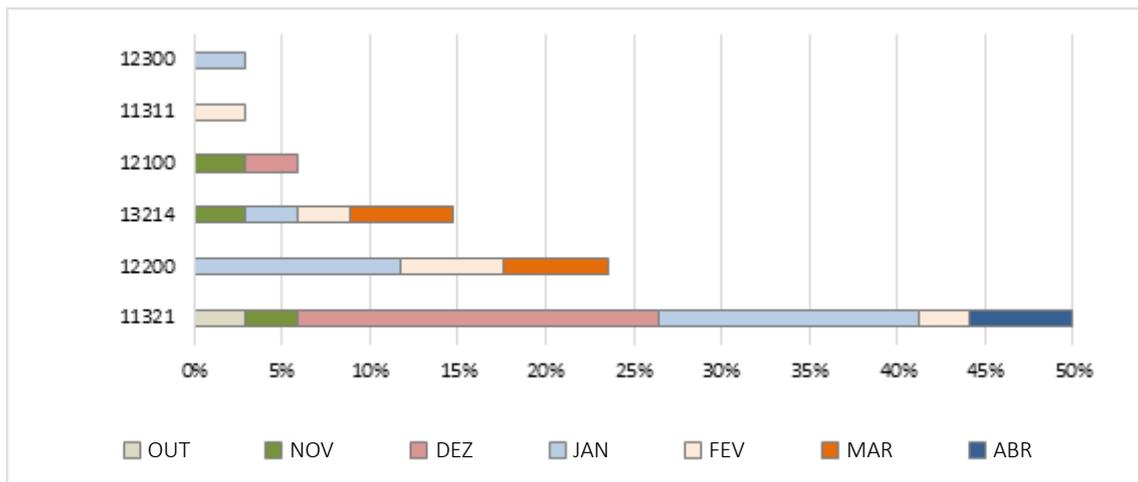


Figura 6 | Distribuição mensal de desastres por tipologia de ameaças em Petrópolis. 12300 Alagamento (1); 11311 Queda de blocos (1); 12100 Inundação (2); 13214 Chuvas Intensas (5); 12200 Enxurrada (8); 11321 Deslizamento de solo e/ou rocha (17).

Fonte: Elaboração própria.

Os danos humanos (DH) referem-se ao impacto sobre pessoas; na base de dados trata-se do número de óbitos, feridos, enfermos, desabrigados, desalojados, desaparecidos e outros afetados. Na Tabela 1 observa-se que esta última variável representa 97% dos DH, causados principalmente por deslizamentos de solo e/ou rocha (45,6% dos eventos). Os dados evidenciam que, independente do tipo de dano, o número de pessoas impactadas é alto, gerando gastos elevados recorrentemente. Além disso, Acciari e Ribeiro (2022) indicam que, apenas no ano de 2021, a estimativa de investimentos para prevenção de desastres era de R\$ 2 milhões, no entanto, além de não ter sido gasto, o valor era menor do que a metade prevista para ser gasta com decorações natalinas (R\$ 5,5 milhões), indicando um descaso com a situação histórica do município.

Tabela 1 | Danos humanos (DH) por tipologia de eventos presentes na série histórica de ocorrências de desastres no município de Petrópolis, período 2001 – 2022

COBRADE	11321	12200	13214	12100	12300	11311	TOTAIS	
Total danos humanos	373.959	95.623	348.561	1.119	40	15	819.317	100,00%
%	45.6	11.7	42.5	0.1	0.1	0.0	100.0	
Óbitos	104	81	85	0	0	0	270	0.03%
Feridos	530	16	356	0	0	0	902	0.11%
Enfermos	143	0	200	0	0	0	343	0.04%
Desabrigados	2287	2921	1629	0	0	0	6.837	0.83%
Desalojados	6171	8605	660	19	8	15	15.478	1.89%
Desaparecidos ¹	23	0	203	0	0	0	226	0.03%
Outros afetados	364701	84000	345428	1100	32	0	795.261	97.06%

Fonte: Elaboração própria.

A média histórica de DH apresenta uma crescente entre 2001 e 2022. Essa média foi excedida em 2005, 2013 e 2022, sendo que em 2022 os DH correspondem a 40,64% do total do período (Tabela 2), coincidindo, novamente, com os períodos de maior precipitação. Segundo Cabral *et al.* (2023), o evento ocorrido em 2011 na região serrana do Rio (Petrópolis e Teresópolis) foi o segundo maior evento em número de mortes ocorrido em função de deslizamentos na história do Brasil.

Tabela 2 | Valores da distribuição anual dos danos humanos (DH) em Petrópolis

Ano	2001	2003	2004	2005	2007	2008	2009	2010	2011	2013	2015	2016	2018	2022
Total danos humanos	5773	1957	3847	130056	738	46906	22336	58544	48239	152292	0	0	15695	332934
%	0.70	0.24	0.47	15.87	0.09	5.73	2.73	7.15	5.89	18.59	0.00	0.00	1.92	40.64
Óbitos	38	17	0	0	5	9	7	3	71	34	0	0	3	83
Feridos	143	320	1	0	7	16	10	0	0	49	0	0	4	352
Enfermos	143	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	200
Desabrigados	812	88	89	0	223	81	29	7	2805	1074	0	0	0	1629
Desalojados	4375	20	544	56	335	1800	90	33	6363	1135	0	0	260	467
Desaparecidos	22	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	203
Outros afetados	240	1512	3213	130000	168	45000	22200	58500	39000	150000	0	0	15428	330000

Fonte: Elaboração própria.

Os valores monetários de danos e perdas (D&L) causados por enxurradas em janeiro de 2011 representam 43% do impacto para Petrópolis no período 2001 – 2022. No total, somando as percentagens de outros anos (2001, 2008 e 2016), as enxurradas representam 52% dos D&L no município, e seguem atingindo cifras altíssimas (Tabela 3). Nesse contexto, Cabral *et al.* (2023) afirmam que as perspectivas do município não são promissoras, tendo em vista a descontinuidade dos programas de prevenção de desastres, como o caso do programa de alerta, que não estava funcionando durante a chuva de 2022.

Tabela 3 | Valores monetários de danos e perdas em Petrópolis: soma de danos materiais (DM), prejuízos públicos (PEPL) e prejuízos privados (PEPR)

ANO	COBRADE	D&L US\$	%
2001	11321	38,396,426.27	10
	12200	6,973,728.00	2
2003	11321	10,005,759.76	3
	11321	6,781,324.60	2
2004	12100	0.00	0
	12300	0.00	0
2005	11321	0.00	0
2007	11321	16,387,420.05	4
2008	12200	7,144,301.59	2
2009	11321	4,877,982.03	1
	12100	0.00	0
2010	11321	0.00	0
2011	12200	167,632,309.83	43%
2013	11311	6,211.18	0%
	11321	52,954,078.74	14%
2015	12200	4,216.85	0%
2016	12200	21,444,285.63	5%
	13214	2,052,260.06	1%
2018	12200	0.00	0%
	13214	2,234,802.67	1%

ANO	COBRADE	D&L US\$	%
2022	13214	54,828,781.60	14%
2001 - 2022	TOTAL US\$	391,723,888.85	100%

Fonte: Elaboração própria.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com as análises foi possível confirmar que o evento ocorrido em 2022 foi um evento extremo meteorológico, sendo o mais severo das últimas décadas, estando associado com os maiores danos humanos registrados no município de Petrópolis. O estudo apontou indícios de que esse evento tenha ocorrido, entre outros fatores, em função de uma chuva concentrada em apenas um local, ponto este que carece de aprofundamento por pesquisas futuras.

O estudo não encontrou tendência significativa de alteração (positiva ou negativa) para os índices de chuvas mensais, RX1, RX5 ou anomalias climáticas para o município de Petrópolis. No entanto, é importante realizar estudos adicionais para verificar tendências de eventos extremos, usando séries temporais de precipitação de outros municípios na Região Sudeste ou considerando outras metodologias.

As análises também permitiram identificar que o evento de 2022 esteve associado com os maiores danos humanos registrados no município de Petrópolis. Em termos de danos humanos, 2005 e 2013 também podem ser considerados extremos, uma vez que excederam em muito a média anual, todos estes deflagrados por eventos pluviométricos.

Contrariamente à atribuição do desastre apenas ao alto volume pluviométrico, o estudo identificou poucos indícios de ações preventivas ocorridas anteriormente ao período chuvoso ou nos meses seguintes em prol da drenagem de água, reforçando a necessidade da melhoria da governança relacionada à redução do risco de desastres em curto, médio e longo prazo, ainda que esse tema não tenha sido aprofundado na pesquisa em questão. Além disso, existem evidências de descontinuidade dos programas de redução de risco de desastre no município que carece de maior atenção.

NOTA

1| O número de pessoas desaparecidas geralmente se transforma em número de óbitos.

AGRADECIMENTOS

Ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Espírito Santo (Ifes), *campus* Vitória, pelo apoio no desenvolvimento da pesquisa.

REFERÊNCIAS

ACCIARI, L.; RIBEIRO, M. **Risk, resilience and gender in the current Petrópolis tragedy**. UN Women, 2022. Available at: <https://wrd.unwomen.org/explore/insights/risk-resilience-and-gender-current-petropolis-tragedy>. Accessed on: 5 aug. 2023.

ALCÂNTARA, E. *et al.* **Deadly disasters in Southeastern South America: flash floods and landslides of February 2022 in Petrópolis, Rio de Janeiro**, Nat. Hazards Earth Syst. Sci. Discuss. Available at: <https://doi.org/10.5194/nhess-2022-163>, 2022.

ARAÚJO, L. M. N. *et al.* Avaliação da distribuição espaço-temporal histórica de eventos chuvosos no Rio de Janeiro. In: XIV WORLD WATER CONGRESS, 2011, Porto de Galinhas. **Proceedings** [...], 2010.

ASSUMPÇÃO, R. S. F. V. **Petrópolis – um histórico de desastres sem solução?** Do Plano Koeller ao Programa Cidades Resilientes. 2015. Tese (Doutorado em Ciências na área de Saúde Pública) – Escola Nacional de Saúde Pública Sérgio Arouca, Rio de Janeiro, 2015. Available at: <https://www.arca.fiocruz.br/handle/icict/40233>. Accessed on: 12 nov. 2022.

AVILA-DIAZ, A. *et al.* Assessing current and future trends of climate extremes across Brazil based on reanalyses and earth system model projections. **Climate Dynamics**, v. 55, p. 1403–1426, 2020. Available at: <https://doi.org/10.1007/s00382-020-05333-z>.

BECK, Z. J. V. Meio ambiente e cidades resilientes: reflexões sobre o desastre em Petrópolis no ano de 2022. **Revista da Emerj**, v. 24, n. 2, p. 202–216. 2023.

BRASIL. Ministério do Desenvolvimento Regional. Secretaria de Proteção e Defesa Civil. Universidade Federal de Santa Catarina. Centro de Estudos e Pesquisas em Engenharia e Defesa Civil. **Atlas Digital de Desastres no Brasil**. Brasília: MDR, 2022. Available at: <http://atlasdigital.mdr.gov.br/paginas/index.xhtml>

BUNHAK, A. C. S.; WANDERLEY, H. S. Change in number of rainy days in the municipality of Visconde de Mauá, Rio de Janeiro. **Journal of Biotechnology and Biodiversity**, v. 8, n. 4. 2020. Available at: <https://doi.org/10.20873/jbb.uft.cemaf.v8n4.bunhak>

CABRAL, V. *et al.* The consequences of debris flows in Brazil: a historical analysis based on recorded events in the last 100 years. **Landslides**, v. 20, p. 511–529, 2023. Available at: <https://doi.org/10.1007/s10346-022-01984-7>

CAMARINHA, P. I.; DEBORTOLI, N. S.; HIROTA, M. **Índice de vulnerabilidade aos desastres naturais relacionados às secas no contexto de mudanças climáticas**. Produto II: Relatório com os resultados e discussões sobre o índice de vulnerabilidade e avaliação dos impactos relacionados às secas para as diferentes regiões do Brasil. Florianópolis: WWF Brasil. 2015.

CEMADEN; IBGE. **População em áreas de risco no Brasil**. 2018. Available at: <https://www.ibge.gov.br/geociencias/organizacao-do-territorio/tipologias-do-territorio/21538-populacao-em-areas-de-risco-no-brasil.html?=&t=acesso-ao-produto>. Accessed on: 15 nov. 2022.

COSTA, J. *et al.* Validação dos dados de precipitação estimados pelo Chirps para o Brasil. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 24, jan-jul. 2019. Available at: <http://dx.doi.org/10.5380/abclima.v24i0.60237>

COSTA, A. A. *et al.* Precipitation extremes over the tropical Americas under RCP4.5 and RCP8.5 climate change scenarios: results from dynamical downscaling simulations. **International Journal of Climatology**, p. 1–17. 2022. Available at: <https://doi.org/10.1002/joc.7828>.

COUTINHO, S. M. V. *et al.* The Nexus+ approach applied to studies of Impacts, vulnerability and adaptation to climate change in Brazil. **Sustainability in Debate**, [s. l.], v. 11, n. 3, p. 24–56, 2020. DOI 10.18472/SustDeb.v11n3.2020.33514.

DEBORTOLI, N. S. *et al.* An index of Brazil's vulnerability to expected increases in natural flash flooding and landslide disasters in the context of climate change. **Nat Hazards**, v. 86, p. 557–582. 2017. DOI 10.1007/s11069-016-2705-2.

DOURADO, F.; ARRAES, T. C.; SILVA, M. O Megadesastre da Região Serrana do Rio de Janeiro – as Causas do Evento, os Mecanismos dos Movimentos de Massa e a Distribuição Espacial dos Investimentos de Reconstrução

no Pós-Desastre. **Anuário do Instituto de Geociências**, v. 35, n. 2, p. 43-54. 2012. Available at: http://dx.doi.org/10.11137/2012_2_43_54

FREITAS, M. A. S. Um sistema de suporte à decisão para o monitoramento de secas meteorológicas em regiões semiáridas. **Revista Tecnologia**, v. suplem, p. 84-95, 2005.

FUNK, C. *et al.* The climate hazards infrared precipitation with stations – a new environmental record for monitoring extremes. **Scientific data**, v. 2, n. 1, p. 1-21, 2015. Available at: <https://doi.org/10.1038/sdata.2015.66>

GRUBERTT, B. **Seis meses após tragédia em Petrópolis, famílias retornam para áreas de risco e obras de contenção ainda não foram realizadas**. G1, 15 ago. 2022. Bom Dia Rio. Available at: <https://g1.globo.com/rj/rio-de-janeiro/noticia/2022/08/15/seis-meses-apos-tragedia-em-petropolis-familias-retornam-para-areas-de-risco.ghtml>. Accessed on: 13 nov. 2022.

IBGE. Conselho Nacional de Estatística, Serviço Nacional de Recenseamento. **Censo Demográfico de 1940**. Available at: https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/periodicos/65/cd_1940_p15_rj.pdf. Accessed on: 18 nov. 2022.

IBGE. **População em áreas de risco no Brasil**. Rio de Janeiro: IBGE. 2018. 91 p.

IBGE. **Censo Demográfico 2010**. Rio de Janeiro, 2010. Available at: <https://censo2010.ibge.gov.br/resultados.html>. Accessed on: 14 nov. 2022.

IBGE. **Biomass e Sistema Costeiro Marinho do Brasil compatível com a escala 1:250.000**. Série Relatórios Metodológicos. 2019. Available at: <https://www.ibge.gov.br/apps/biomass/#/home>. Accessed on: 4 nov. 2022.

IBGE. **Cidades**. Available at: <http://cidades.ibge.gov.br/>. Accessed on: 8 nov. 2022.

IPCC. **Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation**. A Special Report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change [FIELD, C. B. *et al.* (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK, and New York, NY, USA, 2012. 582 p.

IPCC. **Climate Change 2021: the physical science basis**. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Masson-Delmotte, V. *et al.* (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, p. 3–32. 2022. DOI 10.1017/9781009157896.001.

IPCC. **Climate Change 2022: impacts, adaptation, and vulnerability**. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [PÖRTNER, H.-O. *et al.* (eds.)]. Cambridge University Press. In Press. 2022. DOI 10.1017/9781009325844

KENDALL, M. G. **Rank Correlation Measures**. Ed. Charles Griffin. London. Lira, C. S. 1975.

LAHSEN, M.; RIBOT, J. Politics of attributing extreme events and disasters to climate change. **Wires Climate change**, v. 13. 2022. DOI 10.1002/wcc.750

MANN, H. B. Nonparametric tests against trend. **Econometrica: Journal of the econometric society**, p. 245-259. 1945.

MAPBIOMAS. **Mapeamento anual das áreas urbanizadas no Brasil entre 1985 e 2020**. 2021. Available at: <https://drive.google.com/file/d/1cZ7KoUywnDcLAKokanjxoYmNAPffsVBW/view?usp=sharing>. Accessed on: 28 nov. 2022.

MORAES, O. L. L. Proposing a metric to evaluate early warning system applicable to hydrometeorological disasters in Brazil. **International Journal of Disaster Risk Reduction**, v. 87, 13p. 2023. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2023.103579>

OSCAR JÚNIOR, A. C. Precipitation Trends and Variability in River Basins in Urban Expansion Areas. **Water Resour Manage**, v. 35, p. 661–674, 2021. Available at: <https://doi.org/10.1007/s11269-020-02749-4>

PAINEL BRASILEIRO DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS. **Base científica das mudanças climáticas**. Contribuição do Grupo de Trabalho 1 do Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas ao Primeiro Relatório da Avaliação Nacional sobre Mudanças Climáticas [AMBRIZZI, T.; ARAÚJO, M. (eds.)]. COPPE. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 464 p. 2-14. 2014.

PRABHAKAR, S. V. R. K.; SRINIVASAN, A.; SHAW, R. Climate change and local level disaster risk reduction planning: need, opportunities and challenges. **Mitig Adapt Strateg Glob Change**, v. 14, p. 7–33. 2009.

PREFEITURA MUNICIPAL DE PETRÓPOLIS. **Plano Municipal de Redução de Risco (PMRR): 1ª (Revisão), 2ª, 3ª, 4ª e 5ª Distritos – Petrópolis, RJ - Programa de Urbanização, Regularização e Integração de Assentamentos Precários – 6a Etapa Reflexão e Proposição de Estratégias de Intervenções não estruturais para a Redução do Risco**. Petrópolis: Prefeitura Municipal de Petrópolis (PMP) – Secretaria de Habitação (SEH), 2017. Available at: <https://sig.petropolis.rj.gov.br/cpge/Reflexoes.pdf>. Accessed on: 30 oct. 2022.

ROOY, M. P. V. A rainfall anomaly index independent of time and space. Notes. **Weather Bureau of South Africa**, v. 14, p. 43-48, 1965.

ROZANTE, J. R. *et al.* Combining TRMM and Surface Observations of Precipitation: technique and validation over South America. **Weather and Forecasting**, v. 25, p. 885-894, 2010.

SERVIÇO GEOLÓGICO DO ESTADO DO RIO DE JANEIRO. **Cartografia Geotécnica de Aptidão Urbana, 1:10.000 de Petrópolis a “CGU do DRM” – junho/2015 – Relatório Técnico**. 73 p. 2015.

SILVA, S. V. C. da. *et al.* Modelagem bayesiana da precipitação máxima de Petrópolis (RJ) e Poços de Caldas (MG). **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 28, 2023. Available at: <https://doi.org/10.1590/S1413-415220210342>

SILVA, F. P. *et al.* Identification of rainfall and atmospheric patterns associated with Quitandinha River flooding events in Petrópolis, Rio de Janeiro (Brazil). **Nat Hazards**, v. 103, p. 3745–3764, 2020. Available at: <https://doi.org/10.1007/s11069-020-04153-y>

STOTT, P. A. *et al.* Attribution of extreme weather and climate-related events. **Wiley Interdisciplinary Reviews: climate change**, [s. l.], v. 7, n. 1, p. 23–41, 2016. DOI 10.1002/wcc.380.

TORRES, G. P.; CARMO, L. F. R.; PALMEIRA, A. C. P. Estudo da relação entre precipitação e deslizamentos no município de Petrópolis-RJ. **Revista S&G**, n. 15, 2020.

VILLARINI, G. *et al.* Examining flood frequency distributions in the midwest U.S. **Journal of the American Water Resources Association**, v. 47, n. 3, p. 447-463, 2011. Available at: <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.2011.00540.x>