



EVENTOS EXTREMOS DE PRECIPITAÇÃO E SUA RELAÇÃO COM A EROSÃO NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO SANTA MARIA (RS)

*Extreme precipitation events and erosion in the Santa Maria
river hydrographic basin (RS)*

*Eventos de precipitación extrema y erosion en la cuenca
hidrografica del río Santa Maria (RS)*

Carina Petsch  

Programa de Pós-graduação em Geografia – Universidade Federal de Santa Maria
carinapetsch@gmail.com

Eduardo Cunha do Amaral  

Departamento de Geociências – Universidade Federal de Santa Maria
eamaral783@gmail.com

Fábio de Oliveira Sanches  

Programa de Pós-graduação em Geografia – Universidade Federal de Juiz de Fora
fsanches.73@gmail.com

Resumo: Os eventos extremos de precipitação (EEP) se apresentam como deflagradores de diversos desastres naturais, podendo desencadear, por exemplo, processos erosivos com a desagregação e transporte de material sedimentar. Os estudos para a bacia hidrográfica do rio Santa Maria (BHRSM), localizada no sudoeste gaúcho, indicam que as feições erosivas lineares (FEL) ocorrem principalmente em rochas friáveis e porções com alta erosividade da precipitação. Assim, o objetivo deste estudo foi identificar e caracterizar os EEP da BHRSM e avaliar sua relação com os processos erosivos. Os EEP foram obtidos a partir da aplicação do percentil 99 com dados de sete estações meteorológicas (EM), entre 1986-2020. A espacialização e cruzamento dos dados foram realizados no QGIS. A BHRSM teve um total de 695 EEP. Verificou-se que, anualmente, os anos com mais EEP são aqueles com ONI (*Oceanic Niño Index*) positivo. Sazonalmente, primavera e outono são as estações com mais EEP, o que está ligado aos Complexos Convectivos de Mesoescala. Os meses com mais eventos extremos coincidem com os de plantio e colheita de soja. Devido ao manejo da terra, o solo pode ficar exposto e, conseqüentemente, desencadear processos erosivos. Espacialmente, observou-se que a predominância de FEL ocorre na área de influência da EM Ponte Toropi II, que concentra 50% dos

eventos extremos da BHRSM. Este estudo aponta que pode ocorrer o desenvolvimento das FEL em função dos EEP, além do contexto de substrato arenoso pouco consolidado, que já configura um cenário de fragilidade ambiental para a BHRSM.

Palavras-chave: Percentil 99. Chuva. SIG.

Abstract: The extreme precipitation events (EEP) are presented as triggers of several natural disasters, being able to trigger, for example, erosion processes with the disaggregation and transport of sedimentary material. Studies for the Santa Maria river basin (BHRSM), located in the southwest of Rio Grande do Sul, indicate that linear erosion features (FEL) occur mainly in friable rocks and portions with high erosivity of precipitation. The objective of this study is to identify and characterize the EEP of the BHRSM and evaluate its relationship with erosion processes. The EEP were obtained from the application of the 99th percentile with data from seven meteorological stations (EM), between 1986-2020. The spatialization and crossing of the data were performed in QGIS. BHRSM had a total of 695 EEP. It is verified that annually the years with more EEP are those with positive ONI (Oceanic Niño Index). Seasonally, spring and autumn are the seasons with more EEP, which is linked to Mesoscale Convective Complexes. The months with the most extreme events coincide with the planting and harvesting of soybeans, due to land management, the soil can be exposed and consequently trigger erosion processes. Spatially, it was observed that the predominance of FEL occurs in the EM Ponte Toropi II area of influence, which concentrates 50% of the extreme events of the BHRSM. This study pointed out that there may be a development of FEL due to the EEP - in addition to the context of poorly consolidated sandy substrate that already configure a scenario of environmental fragility for the BHRSM.

Keywords: 99th percentile. rain. GIS.

Resumen: Los eventos de precipitación extrema (EEP) se presentan como desencadenantes de varios desastres naturales, pudiendo desencadenar, por ejemplo, procesos de erosión con la desagregación y transporte de material sedimentario. Estudios para la cuenca del río Santa Maria (BHRSM), ubicada en el suroeste de Rio Grande do Sul, indican que las características de erosión lineal (FEL) ocurren principalmente en rocas friables y porciones con alta erosividad de precipitación. El objetivo de este estudio es identificar y caracterizar la EEP de la BHRSM y evaluar su relación con los procesos de erosión. Los EEP se obtuvieron a partir de la aplicación del percentil 99 con datos de siete estaciones meteorológicas (EM), entre 1986-2020. La espacialización y cruce de los datos se realizó en QGIS. BHRSM tuvo un total de 695 EEP. Se comprueba que anualmente los años con más EEP son aquellos con ONI (Índice Oceánico del Niño) positivo. Estacionalmente, la primavera y el otoño son las estaciones con más EEP, lo que está relacionado con los Complejos Convectivos de Mesoescala. Los meses con los eventos más extremos coinciden con la siembra y cosecha de la soja, debido al manejo de la tierra, el suelo puede quedar expuesto y consecuentemente desencadenar procesos de erosión. Espacialmente, se observó que el predominio de FEL ocurre en el área de influencia de la EM Ponte Toropi II, que concentra el 50% de los eventos extremos de la BHRSM. Este estudio señaló que puede haber un desarrollo de FEL debido a la EEP, además del contexto de sustrato arenoso poco consolidado que ya un escenario de fragilidad ambiental para el BHRSM.

Submetido em: 31/10/2022

Aceito para publicação em: 28/06/2022

Publicado em: 15/07/2022

1 INTRODUÇÃO

A análise de padrões espaciais e temporais de eventos climáticos extremos têm recebido maior atenção desde o final da década de 1990, visto que intensificam o risco social e ambiental em diversas regiões do planeta (LEONARD et al., 2014; SANCHES et al., 2015; OHBA; SUGIMOTO, 2019; SANTOS; GALVANI, 2019; OLMO et al., 2020; SILVEIRA et al., 2021; THOMASSEN et al., 2021; ROJPRATAK e SUPHARATID, 2022). Isto posto, destaca-se que os eventos extremos de precipitação (EEP) consistem em elevados ou reduzidos totais de chuva, em geral acima ou abaixo dos limiares definidos como médios (ARMOND; SANT'ANNA NETO, 2017), e estão entre os desastres naturais mais graves, frequentes e generalizados que podem provocar danos importantes aos ambientes ecológicos e às produções agrícolas (LANDRUM; HOLLAND, 2020).

Dessa forma, os EEP têm se tornado frequentes em todo o planeta devido à combinação entre as mudanças climáticas e a circulação atmosférica (DONAT et al., 2016). É por ser necessário aumentar a compreensão sobre os EEP, visando diminuir os impactos sociais, econômicos e ambientais causados por eles (KUNKEL et al., 1999; ZSCHEISCHLER et al., 2018), que esses eventos vêm sendo o foco de diversos estudos (SANCHES et al., 2014; WANDERLEY et al., 2020; OHBA; SUGIMOTO, 2019; SANTOS; GALVANI, 2019; PRIYA; AGILAN 2022; ROJPRATAK; SUPHARATID, 2022; WANG et al., 2022). Ademais, a análise da precipitação é fundamental para o entendimento de processos hidrossedimentológicos, modelagem climática e produção agrícola em bacias hidrográficas (BADOR et al., 2020; XU, 2021), sobretudo porque a chuva apresenta variabilidade significativa, tanto espacial quanto temporalmente, devido à circulação atmosférica, ciclo da água e balanço energético (HEROLD et al., 2016; RUHI et al., 2018; WANDERLEY et al., 2020; ZHANG et al., 2020). Dessa maneira, a análise da precipitação e de eventos extremos fornece um banco de dados essencial para o desenvolvimento de outras pesquisas associadas à temática ambiental, como a avaliação de processos erosivos, por exemplo.

Por sua vez, a degradação da terra pela erosão se destaca como um dos maiores problemas ambientais da atualidade (PHUONG et al., 2017; MIHI et al., 2019; MASROOR et al., 2022). No que se refere à erosão hídrica, ela é causada pela complexa interação entre relevo, clima e atividades humanas que provocam alterações no uso e na cobertura do solo, como

desmatamento, sobrepastoreio e intensificação da agricultura (PANAGOS et al., 2017). Por conseguinte, mudanças nas condições hidroclimatológicas podem provocar aumento nas taxas de erosão (MIHI et al., 2020), já que as gotas de chuva atuam no desprendimento do material do solo e pela força de arrasto da água (VRIELING, 2006).

Para relacionar a questão dos EEP com os processos erosivos, é necessário recorrer às geotecnologias, principalmente em se tratando de grandes áreas. Em vista disto, os Sistemas de Informação Geográfica (SIG) oferecem suporte a análises espaciais no campo da Climatologia (DABRAL et al., 2008), e no caso do mapeamento dos EEP, proporcionam a análise para fins de gestão agrícola, ecológica e de recursos hídricos (MMBANDO; KLEYER, 2020). Ainda nesse sentido, um dos principais problemas em análises de EEP é a falta de acesso a dados climáticos de alta qualidade (ROJPRATAK; SUPHARATID, 2022), portanto, para o uso de dados de estações meteorológicas (EM) é fundamental o uso de interpoladores de dados dos SIG para as porções que não possuem medições.

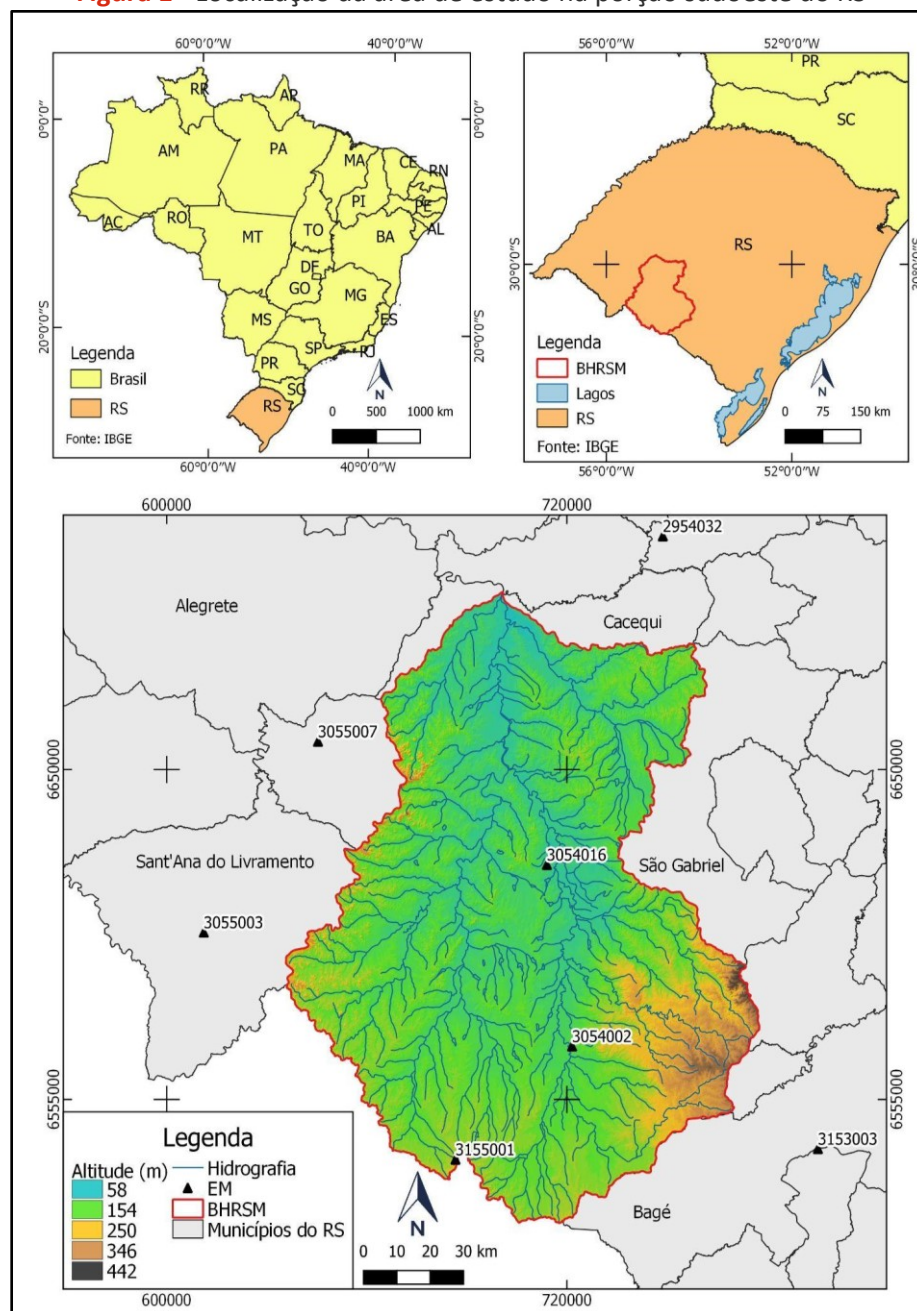
Sanches et al. (2015) já apontaram que os dias com EEP possuem estreita relação com o processo de arenização no Rio Grande do Sul (RS), uma vez que o escoamento superficial atua fortemente na dinâmica erosiva desse processo. Petsch et al. (2022a) indicaram a possibilidade de haver uma relação entre os EEP e a erosão da bacia hidrográfica do rio Santa Maria (BHRSM) e sugeriram maior aprofundamento na análise. Dessa forma, como área de estudo desta pesquisa, foi escolhida a BHRSM, que possui intensos processos erosivos lineares documentados (ROBAINA et al., 2015; RADEMANN et al., 2018; CABRAL et al., 2020; PETSCH et al., 2022b; ROBAINA et al., 2022; PETSCH et al., 2023).

Por conseguinte, o objetivo deste estudo é identificar e caracterizar os EEP da BHRSM e avaliar sua relação com os processos erosivos. Os objetivos específicos deste artigo consistem em: (i) avaliar a incidência anual, sazonal, mensal e por EM dos EEP (percentil 99 de acumulados diários), entre 1986 e 2020; (ii) identificar a frequência relativa e o tempo de retorno dos EEP; (iii) relacionar os EEP com valores anuais de ONI (*Oceanic Niño Index*); e (iv) espacializar os valores de EEP para a BHRSM e relacioná-los com a presença dos processos erosivos em cabeceiras de drenagem.

2 ÁREA DE ESTUDO

A BHRSM abrange uma área de 15.740 km² e está localizada no sudoeste do RS, entre as coordenadas geográficas 29°47' a 31°36' de latitude Sul e 54°00' a 55°32' de longitude Oeste (Figura 1). A BHRSM drena em parte ou a totalidade dos territórios de seis municípios, sendo eles: Cacequi, Dom Pedrito, Rosário do Sul, Sant’ana do Livramento, São Gabriel e Lavras do Sul.

Figura 1 - Localização da área de estudo na porção sudoeste do RS



Fonte: Elaborado pelos autores (2022).

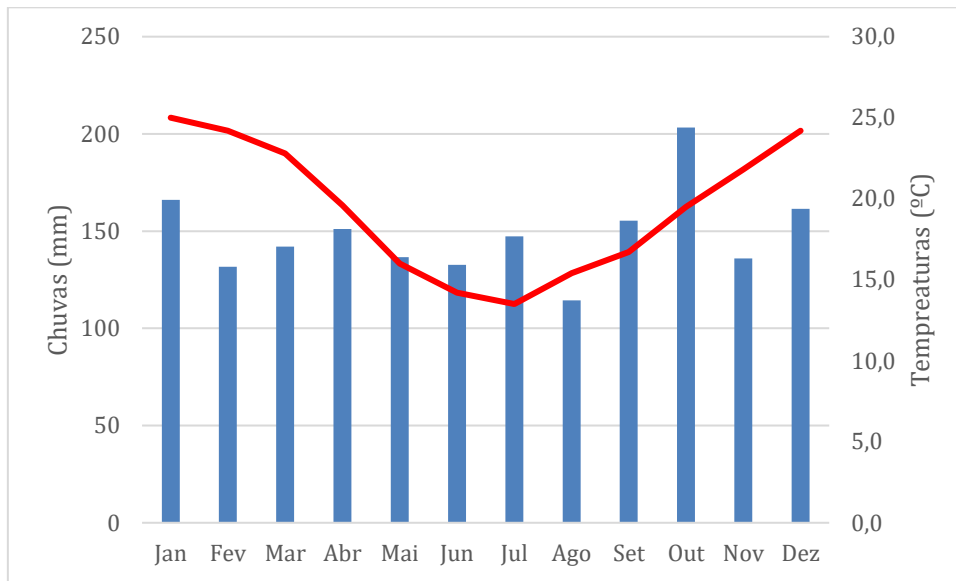
A área de estudo abrange três províncias geomorfológicas: Planalto da Campanha, Depressão Central Gaúcha e Planalto Sul-Rio-Grandense (IBGE, 1986). O mapa hipsométrico (Figura 1) indica que as altitudes na BHRSM variam entre 55 m e 460 m. No que se refere à declividade, predominam valores entre 2 e 5% (PETSCH et al., 2022b).

Quanto à geologia, destacam-se as sequências sedimentares da Bacia do Paraná (WILDNER et al., 2006). Os processos erosivos ocorrem principalmente nas Formações Pirambóia e Sanga do Cabral, devido às rochas serem friáveis (ROBAINA et al., 2015; RADEMANN et al., 2018; PETSCH et al., 2022b). Predominam solos bem desenvolvidos, arenosos e espessos, porém com baixo teor de argila, o que contribui para a desagregação de sua estrutura (ROBAINA et al., 2015; SCCOTI, 2017).

No que se refere ao uso do solo, Petsch et al. (2022c) destacam que a formação campestre predomina, apresentando, porém, diminuição, visto que em 1990 ocupava 66% da BHRSM e, em 2020, ocupava 49%. A cultura da soja foi o uso do solo que mais apresentou crescimento na área, sendo que em 1990 ocupava 78 km² e em 2020 atingiu 2.199 km². Uma área de 1.492 km² de formação campestre foi transformada em lavoura de soja (PETSCH et al., 2022c).

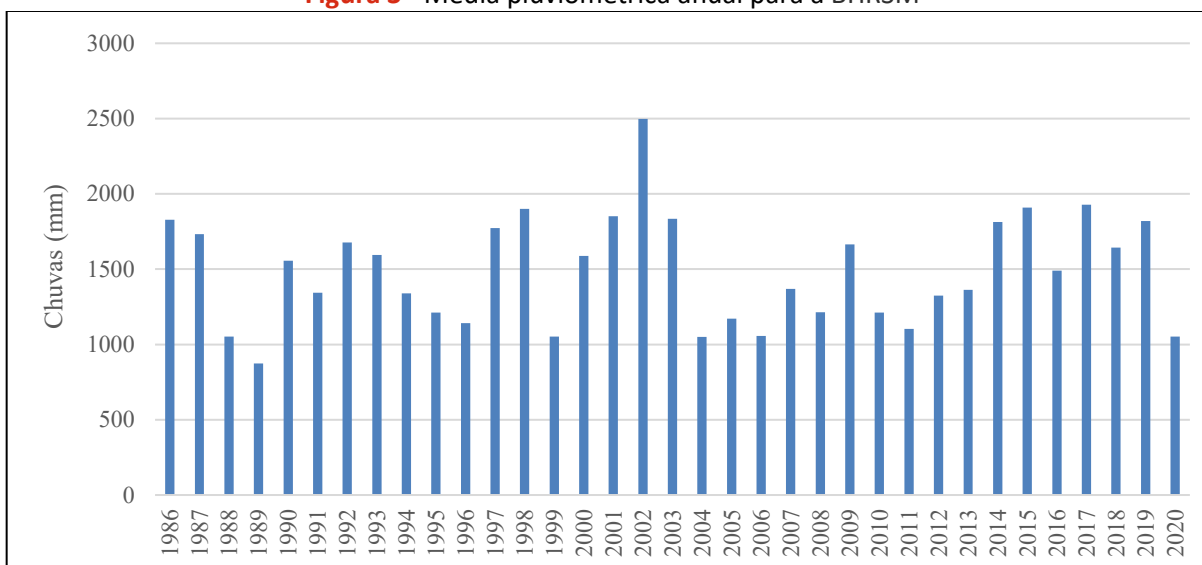
De acordo com a atualização da classificação climática de Köppen desenvolvida por Alvares et al. (2013), o tipo climático da área de estudo é o **Cfa** – mesotérmico, sem estação seca e com verões quentes. A Figura 2 demonstra o comportamento das Normais Climatológicas de chuvas e temperaturas (1991-2020) para Santa Maria (RS).

Figura 2 - Normais Climatológicas (1991-2020) para Santa Maria (RS)



Fonte: INMET (<https://clima.inmet.gov.br/>)

Para Rossato (2011), as condições climáticas regionais estão associadas às participações das massas de ar Tropical Atlântica (mTa) - em torno de 25% a 28% do ano - e Polar Atlântica (mPa) - entre 45% e 48% do ano. Os Sistemas Frontais também possuem uma participação efetiva na dinâmica das chuvas da região, com volumes anuais em torno dos 1.700 mm. As tipologias climáticas encontradas na BHRSM são a Subtropical I - pouco úmida, com precipitação entre 1.200 e 1.500 mm anuais - e a Subtropical II - medianamente úmida, com 1.500 e 1.700 mm anuais (ROSSATO, 2011). A média de precipitação anual da BHRSM é 1.496,5 mm no período de análise (Figura 3), sendo que o ano de 2002 foi o de maior média anual de precipitação, com 2.496,8 mm, e o ano de 1989 foi o de menor valor, com 874,6 mm.

Figura 3 - Média pluviométrica anual para a BHRSM

Fonte: Elaborado pelos autores (2022).

3 METODOLOGIA

Os dados utilizados nesta pesquisa foram obtidos no *site* Hidroweb, da Agência Nacional das Águas¹, referente a sete EM (Quadro 1) para o período de 1986 a 2020. Além disso, é necessário destacar que as EM que se localizam nas imediações dos limites da BHRSM foram inseridas no estudo, visto a importância de se realizar a interpolação de dados de precipitação, conforme recomendado por Renard et al. (1997). Os estudos sobre a seleção das EM e preparação dos dados pluviométricos - preenchimento de falhas, tratamento estatístico e avaliação de consistência - estão descritos no trabalho de Petsch et al. (2022a).

¹ Disponível em: <http://www.snirh.gov.br/hidroweb/serieshistoricas>

Quadro 1 - Informações sobre as sete EM consideradas para o estudo

Código	Nome	Latitude (°)	Longitude (°)	Altitude (m)
3155001	Três Vendas	-31,28	-55,04	210
2954032	Ponte Toropi II	-29,65	-54,43	128
3054002	Dom Pedrito	-30,98	-54,68	136
3054016	Granja Umbu	-30,51	-54,77	115
3055003	Fazenda Encerra	-30,70	-55,84	268
3055007	São Carlos	-30,20	-55,49	141
3153003	Paraíso	-31,23	-53,90	331

Fonte: Hidroweb

3.1 Identificação dos eventos extremos, frequência e estimativa do tempo de retorno

Estudos sobre eventos de precipitação intensa/extrema recomendam a adoção/identificação de parâmetros estatísticos, como os percentis 95 e 99, a partir de suas séries temporais (PRISTO et al., 2018; PAZ et al., 2020; SANCHES et al., 2019; OGASSAWARA et al., 2021, entre outros). Para este trabalho, adotou-se o valor extremo de precipitação diária a partir da aplicação do percentil 99 (P99), seguindo as recomendações do *Expert Team of Climate Change Detection Indices* (ETCCDI)². Em seguida, identificou-se os valores de frequência relativa dos eventos extremos, conforme recomendam os trabalhos de Galvani (2011), Sanches et al. (2019) e Paz et al. (2020).

$$(1) Fr = \frac{n_i}{\sum_i n_i}$$

A frequência relativa (Fr) consiste no número de ocorrência do evento (n_i) em relação ao número total de elementos na série (\sum_i).

O Tempo de Retorno (TR) para cada evento extremo de precipitação foi definido como o inverso da probabilidade (TUCCI, 1997):

² Disponível em: http://etccdi.pacificclimate.org/list_27_indices.shtml.

$$(2) TR = \frac{1}{Fr}$$

O cálculo dos eventos extremos por ano, por estação sazonal, por mês e por EM foi desenvolvido no *software* Excel. A incidência dos eventos extremos foi relacionada aos valores médios anuais de ONI (*Oceanic Niño Index*³), que considera as condições do El Niño quando o ONI é +0,5 ou superior, e as condições da La Niña com valores iguais ou menores que -0,5.

3.2 Elaboração dos mapas e relação com as feições erosivas lineares (FEL)

Para a interpolação dos dados de EEP foi utilizado o IDW (*Inverse Distance Weighting*), usado com êxito em outros estudos (COSTA et al., 2021; TAVARES; SANTOS, 2022), e a espacialização das informações ocorreu no SIG QGIS 3.4. As feições erosivas lineares (FEL) foram identificadas manualmente, utilizando imagens *Google Earth* disponíveis no *plugin Quick Map Services* do QGIS 3.4 (PETSCH et al., 2022b). Elas estão representadas nesta pesquisa pelos pontos que demarcam a cabeceira de drenagem. As imagens de satélite utilizadas para o mapeamento das FEL são de um mosaico com diferentes datas, de acordo com a disponibilidade do *Google Earth*. Desta forma, foi possível relacionar espacialmente a ocorrência de FEL na BHRSM com o número total de eventos extremos.

4 DESENVOLVIMENTO

A partir da aplicação do P99, os valores de chuvas diárias de 66,8 mm, 58 mm, 70,4 mm, 67,1 mm, 67,3 mm, 59,2 mm e 64,2 mm foram considerados como limiares para os episódios de EEP para as EM Três Vendas, Paraíso, Ponte Toropi II, São Carlos, Fazenda Encerra, Granja Umbu e Dom Pedrito, respectivamente. Assim sendo, optou-se por avaliar todos os eventos extremos de precipitação acima do volume de 70 mm, uniformizando, portanto, o parâmetro adotado para as séries de todas as EM utilizadas, bem como tornando a análise mais criteriosa. Os valores extremos de precipitação foram categorizados em classes:

³ https://origin.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ONI_v5.php

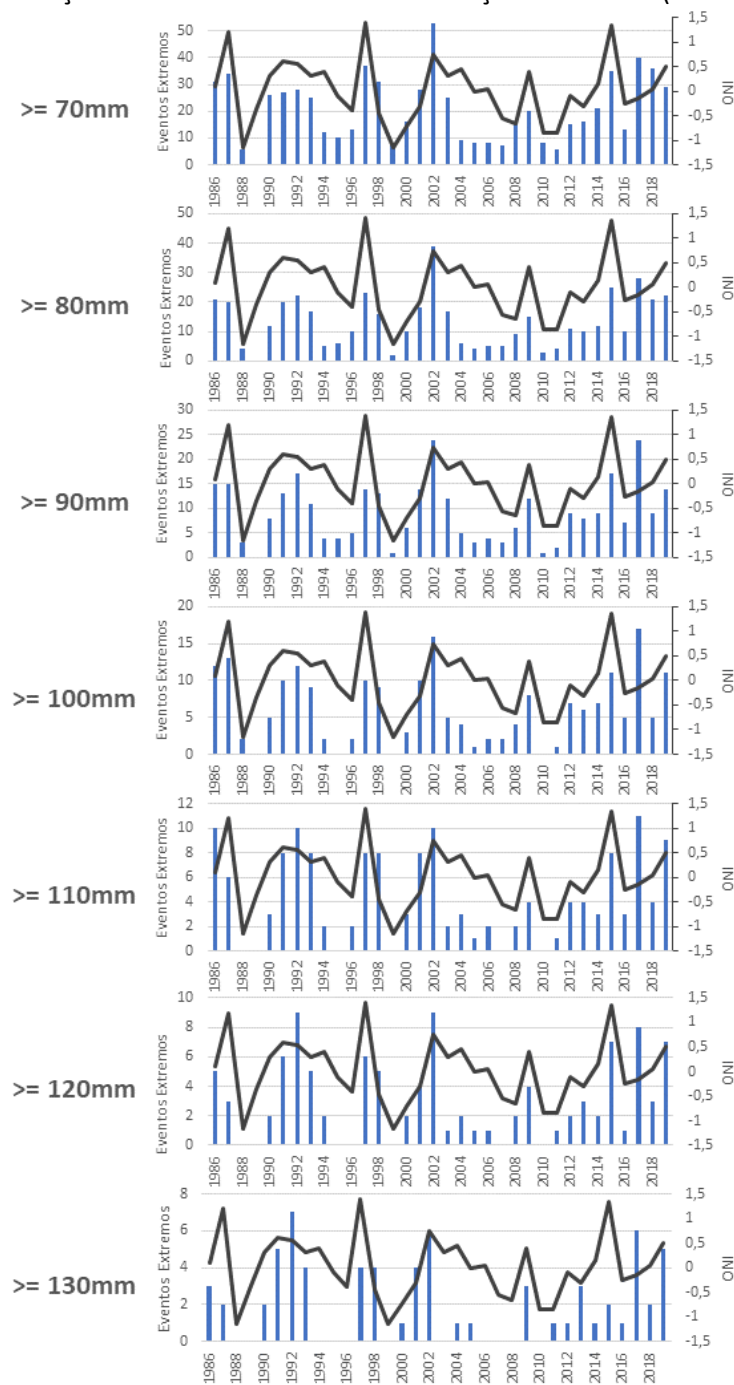
≥ 70 mm, ≥ 80 mm, ≥ 90 mm, ≥ 100 mm, ≥ 110 mm, ≥ 120 mm e ≥ 130 mm. Dessa forma, a BHRSM registrou 695 EEP no período de análise.

4.1 Distribuição anual dos EEP na BHRSM

Temporalmente, há um padrão quanto ao número de EEP em todas as classes avaliadas. Destaca-se que os anos de 2002, 2015 e 2017 são os que concentraram mais eventos extremos, enquanto em 1989 não houve eventos (Figura 4). Em relação ao ONI, os eventos extremos ocorreram de forma mais frequente durante modulações do ENOS positivo, como por exemplo em 1987, 1997, 2002, 2015 e 2019, enquanto os valores negativos de ONI em 1988, 1999, 2010 e 2011 configuram menor número de eventos extremos ou a ausência deles.

De acordo com Grimm (2022), em anos de El Niño fortes anomalias positivas (aumento nas precipitações) ocorrem no sul do Brasil, sobretudo nos meses de novembro, março e abril. Essas condições se dão em virtude de alterações nos padrões circulatórios da atmosfera sobre a porção norte da América do Sul (subsistência da alta atmosfera), direcionando e intensificando a ação dos Jatos de Baixos Níveis (JBN), promovendo a formação dos Complexos Convectivos de Mesoescala (CCM) sobre o sudeste da América do Sul.

Figura 4 - Distribuição anual dos EEP na BHRSM e relação com o ONI (*Oceanic Niño Index*)



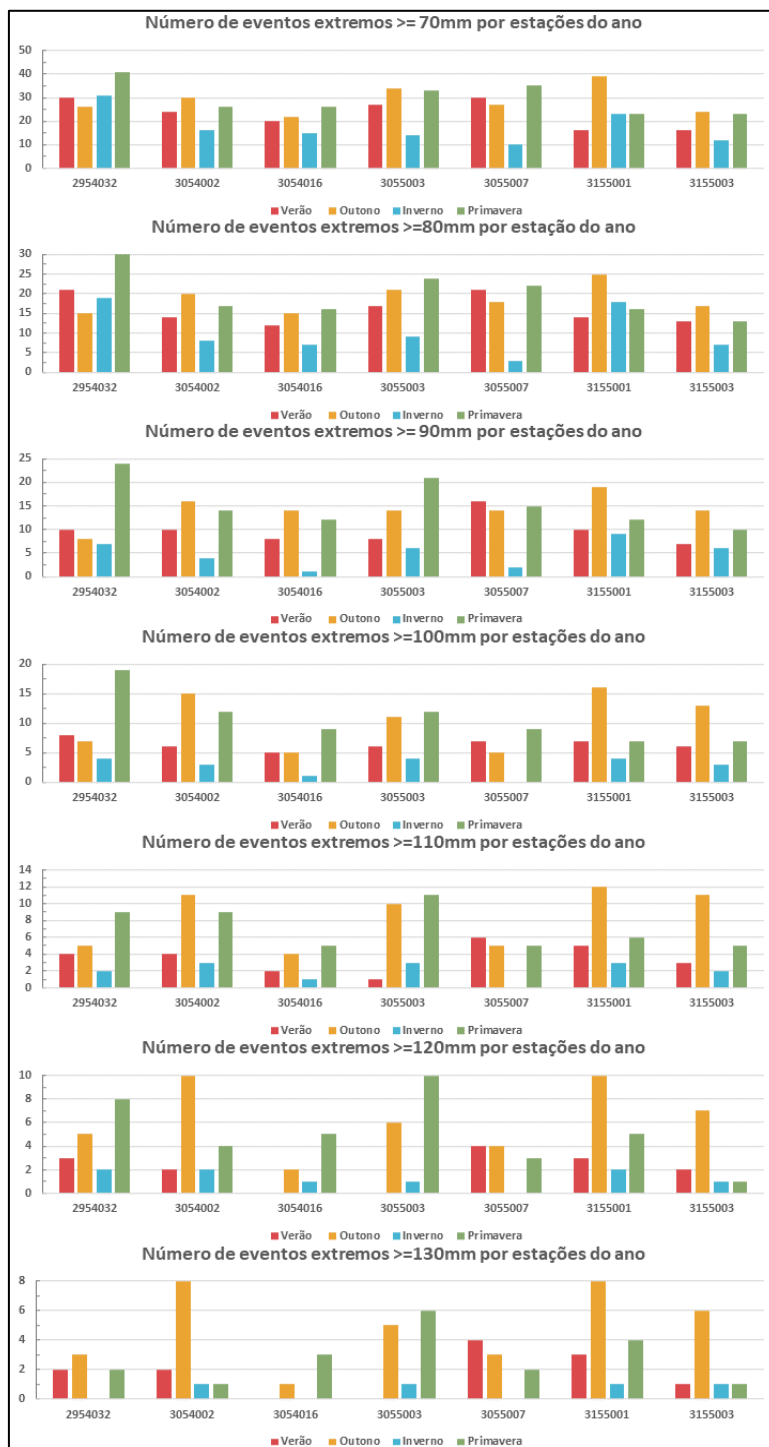
Fonte: Elaborado pelos autores (2022).

4.2 Distribuição sazonal e mensal dos eventos extremos na BHRSM

Os eventos extremos apresentam maior ocorrência na primavera, seguida pelo outono, verão e inverno até a classe de eventos $\geq 110\text{ mm}$ (Figura 5). Após a classe dos EEP $\geq 110\text{ mm}$ a ordem se altera, sendo que o outono passa a figurar como a estação com maior quantidade de eventos extremos, seguido pela primavera, verão e inverno. A ocorrência dos

EEP, principalmente no outono e na primavera, acontece também em função dos CCM. Esse é o período de maior atuação dos JBN associados à formação dos CCM, promovendo episódios de precipitação extrema na região de estudo, sobretudo na primavera e no outono (VIANA et al., 2009; LIMA et al., 2018; SANCHES et al., 2019; MARENGO, 2022).

Figura 5 - Distribuição sazonal dos eventos extremos



Fonte: Elaborado pelos autores (2022).

Trabalhos desenvolvidos por Viana et al. (2009), Sanches et al. (2015), Lima et al. (2018) e Sanches et al. (2019) demonstram que a maioria dos EEP estão associados à participação dos JBN – ventos quentes e úmidos que escoam da Amazônia em níveis de 850 hPa a 700 hPa. Quando esses ventos modulam sobre a região, formam CCM. Nesse viés, Sanches et al. (2019) ressaltam que ocorreu um aumento na frequência dos CCM relacionado às mudanças ambientais ocorridas na Amazônia e manifestadas na porção sudeste da América do Sul nas últimas três décadas. Para Machado et al., (1998), Carvalho e Jones (2001), Sanches et al. (2019) e Marengo (2022), a formação dos CCM na porção central da América do Sul faz parte de uma complexa relação entre o escoamento atmosférico dos JBN da região Amazônica que, influenciados pela Cordilheira dos Andes, transportam calor e umidade da região equatorial para as regiões Sul e Sudeste do Brasil, gerando grandes sistemas convectivos na Bacia do Prata (centro da América do Sul).

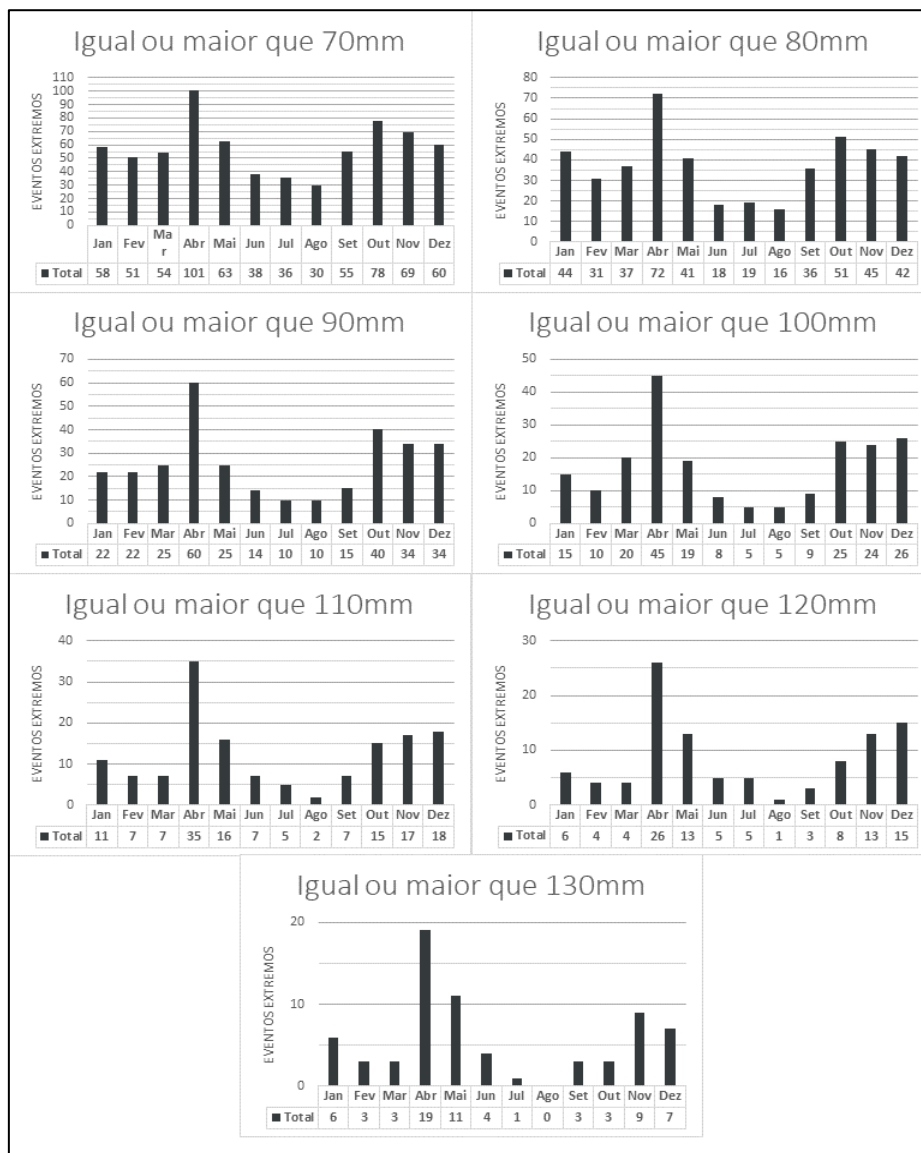
A ocorrência de EEP e sua disposição ao longo do ano possuem um comportamento similar em todas as classes (Figura 6). No que se refere aos meses com maior concentração de EEP, observa-se que ocorrem entre setembro/outubro até abril/maio. O mês de abril se destaca como o de maior número de ocorrências, sendo um total de 358 EEP distribuídos da seguinte forma: 101, 72, 60, 45, 35, 26 e 19 eventos para as classes de ≥ 70 mm, ≥ 80 mm, ≥ 90 mm, ≥ 100 mm, ≥ 110 mm, ≥ 120 mm e ≥ 130 mm respectivamente. Na classe de ≥ 130 mm, que concentra os eventos de maior intensidade, houve um total de 69 EEP, sendo que 27% deles ocorreram no mês de abril.

Além do mês de abril, outros se destacaram. Nas classes de ≥ 70 mm, ≥ 80 mm e ≥ 90 mm, destaca-se o mês de outubro, com 78, 51 e 40 EEP respectivamente. Nas classes de ≥ 100 mm, ≥ 110 mm e ≥ 120 mm, o mês de dezembro é o que se destaca, com 26, 18 e 15 EEP respectivamente. Na classe ≥ 130 mm, o mês de maio se sobressaiu com 11 EEP, além dos meses de novembro, dezembro e janeiro, com 9, 7 e 6 eventos cada.

Os resultados obtidos nesta pesquisa corroboram os dados de Sanches et al. (2019) para a área de Alegrete (RS), sendo que os autores observaram um padrão similar para os EEP superiores a 150 mm, com cinco EEP nos meses de maio, dois eventos em abril e um EEP em novembro, dezembro, fevereiro, março e junho. Petsch et al. (2022a), para a BHRSM,

apontaram que 65% da erosividade anual se concentra entre outubro e abril e 73% no período de outubro a maio.

Figura 6 - Número de EEP por mês e por classe avaliada



Fonte: Elaborado pelos autores (2022).

As maiores quantidades de EEP ocorrem em meses atrelados ao ciclo de produção da cultura temporária de soja, com plantio durante a primavera e colheita durante o outono, fases em que o solo se encontra com menor cobertura vegetal ou exposto. Dessa forma, alguns autores destacam que o risco de erosão pode ser altamente variável durante o ano, dependendo dos efeitos sazonais e do manejo da terra. Sendo assim, é necessário buscar

alternativas de manejo e técnicas ligadas à manutenção da cobertura de palha seca para a proteção do solo (VRIELING et al., 2006; ZHANG et al., 2022). Nesse viés, Terassi et al. (2019) afirmam que é importante avaliar as chuvas extremas diárias para planejar as atividades agrícolas e refletir sobre práticas de manejo para reduzir a erosão. Sobretudo para a BHRSM, que apresentou a conversão de formações naturais campestres para a cultura temporária de soja, em muitas áreas (PETSCH et al., 2022c).

4.3 Frequências e tempo de retorno de eventos extremos por EM

Nas classes de ≥ 70 mm, ≥ 80 mm e ≥ 100 mm, a maior *Fr* ocorre na EM Ponte Toropi II, enquanto na classe de ≥ 90 mm a EM Ponte Toropi II e a EM Fazenda Encerra apresentam o *Fr* de 0,39 e a EM Três Vendas atinge o valor máximo de *Fr* de 0,40. A EM Dom Pedrito apresenta o maior *Fr* na classe de ≥ 110 mm e a EM Três Vendas é a que possui o maior valor nas classes de ≥ 120 mm e ≥ 130 mm. Quanto ao tempo de retorno, a EM Ponte Toropi II se destaca com os menores valores, sendo de 0,27 anos, 0,40 anos, 0,69 anos e 0,90 anos para as classes de ≥ 70 mm, ≥ 80 mm, ≥ 90 mm e ≥ 100 mm, respectivamente, novamente com exceção da classe de ≥ 90 mm, onde a EM Três Vendas apresenta RT de 0,68 anos. A EM Três Vendas é a que possui menor RT nas classes de ≥ 120 mm e ≥ 130 mm, com 1,7 e 2,13 anos respectivamente (Tabela 1). Os resultados de frequência relativa e de tempo de retorno mostram-se similares aos resultados encontrados por Sanches et al. (2016) para a região de Alegrete, também no sudoeste do Rio Grande do Sul, em um estudo de tendência ao longo do século XX.

Tabela 1 - Frequência e tempo de retorno dos eventos extremos por EM

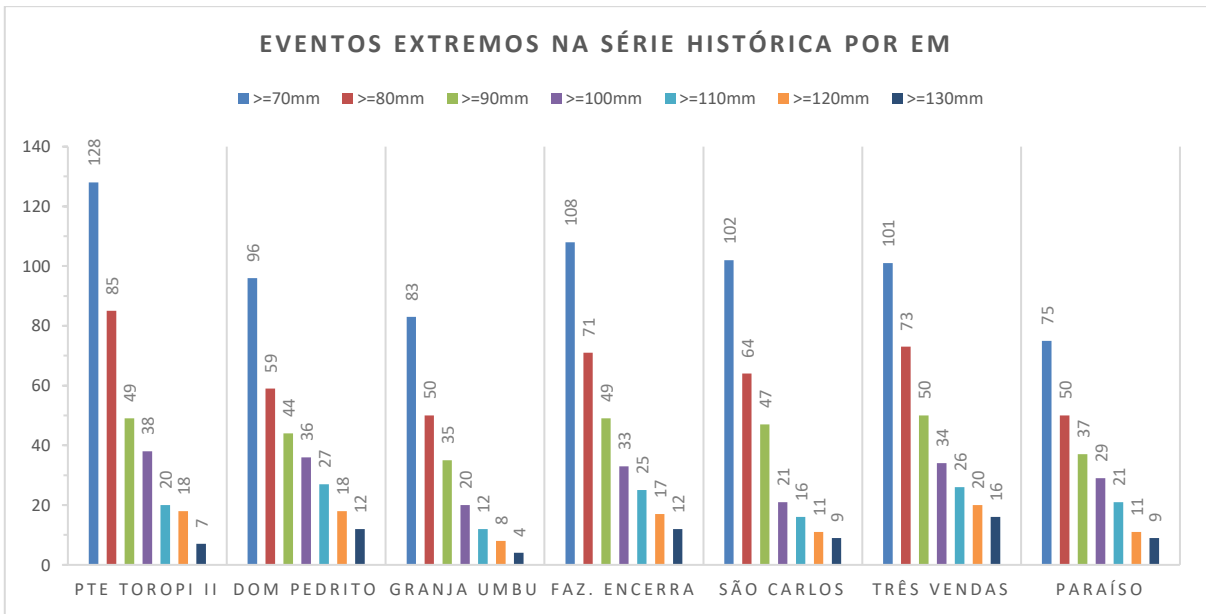
	Ponte Toropi II		Dom Pedrito		Granja Umbu		Fazenda Encerra		São Carlos		Três Vendas		Paraíso	
	Fr (%)	TR	Fr (%)	TR	Fr (%)	TR	Fr (%)	TR	Fr (%)	TR	Fr (%)	TR	Fr (%)	TR
≥70 mm	1,03	0,27	0,77	0,35	0,66	0,41	0,86	0,31	0,82	0,33	0,81	0,34	0,60	0,45
≥80 mm	0,68	0,40	0,47	0,58	0,40	0,68	0,57	0,48	0,51	0,53	0,58	0,47	0,40	0,68
≥90 mm	0,39	0,69	0,35	0,77	0,28	0,97	0,39	0,69	0,37	0,72	0,40	0,68	0,29	0,92
≥100 mm	0,30	0,90	0,28	0,94	0,16	1,70	0,26	1,03	0,16	1,62	0,27	1,00	0,23	1,17
≥110 mm	0,16	1,70	0,21	1,26	0,09	2,83	0,20	1,36	0,12	2,13	0,20	1,31	0,16	1,62
≥120 mm	0,14	1,89	0,14	1,89	0,06	4,25	0,13	2,00	0,08	3,09	0,16	1,70	0,08	3,09
≥130 mm	0,05	4,86	0,09	2,83	0,03	8,50	0,09	2,83	0,07	3,78	0,12	2,13	0,07	3,78

Fonte: Elaborado pelos autores (2022).

4.4 Distribuição dos EEP por EM

Para as classes de ≥ 70 mm e ≥ 80 mm, a EM Ponte Toropi II predomina, totalizando 128 e 85 EEP respectivamente. Na classe de ≥ 90 mm, a EM Três Vendas predomina com 50 EEP, seguida pelas EM Ponte Toropi II e Fazenda Encerra, com 49 EEP cada uma. Na classe de ≥ 100 mm a EM Ponte Toropi II predomina novamente, com 38 EEP; em seguida as EM Dom Pedrito e Três Vendas possuem, respectivamente, 36 e 34 EEP. Na classe de ≥ 110 mm a EM Dom Pedrito predomina com 27 EEP, seguida pelas EM Três Vendas e Fazenda Encerra, com 26 e 25 EEP cada. Na classe de ≥ 120 mm, a EM Três Vendas predomina com 20 eventos, seguida pela EM Ponte Toropi II e Dom Pedrito, com 18 EEP. Na classe de ≥ 130 mm, a EM Três Vendas predomina com 16 EEP, seguida pelas EM Dom Pedrito e Fazenda Encerra, com 12 EEP (Figura 7).

Figura 7 - EEP por classe e por EM

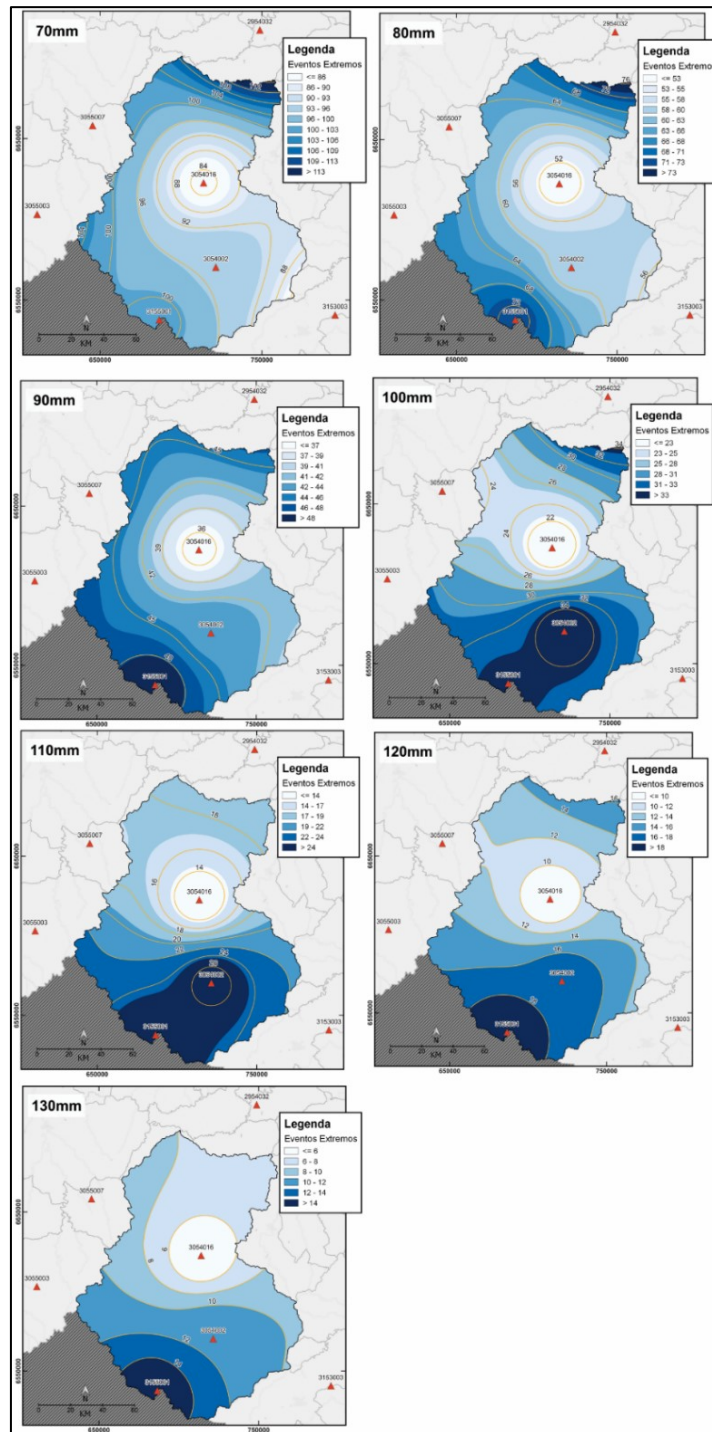


Fonte: Elaborado pelos autores (2022).

4.5 Espacialização dos EEP na BHRSM e relação com as FEL

Espacialmente, observa-se a predominância de EEP de ≥ 70 mm e de ≥ 80 mm na porção nordeste da BHRSM (Figura 8), referente a EM Ponte Toropi II. Tem-se a predominância da classe de ≥ 90 mm nas porções norte, oeste e sul, enquanto a classe de ≥ 100 mm predomina em nordeste e sul. Nas classes de ≥ 110 mm, ≥ 120 mm e ≥ 130 mm, têm-se a predominância dos EEP na porção sul da BHRSM (Figura 8). Destaca-se que a BHRSM possui como declividade predominante valores abaixo de 5%, com uma variação de altitude de aproximadamente 400 m, portanto, fatores fisiográficos não foram considerados como significativos na distribuição dos eventos extremos na BHRSM.

Figura 8 - Espacialização dos EEP por classe.

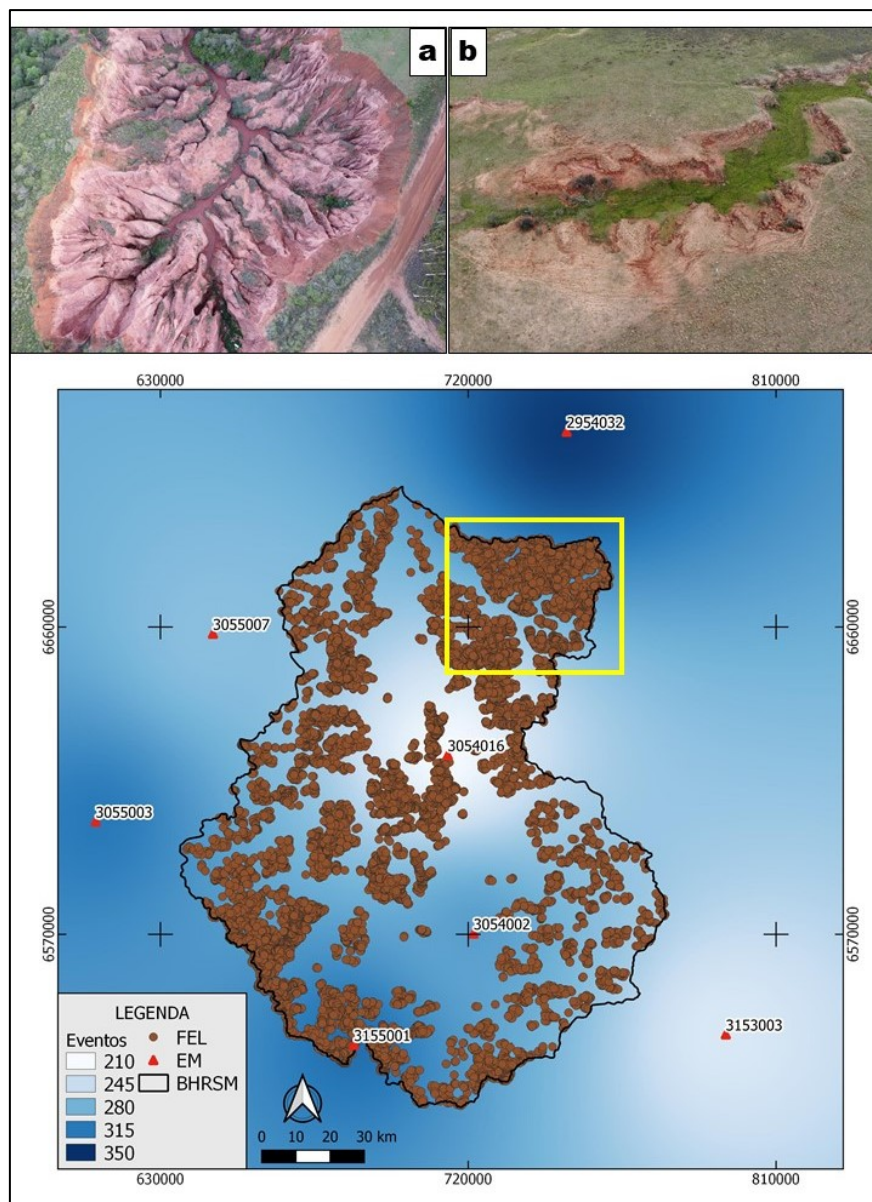


Fonte: Elaborado pelos autores (2022).

A espacialização das FEL da BHRSM demonstra que a concentração ocorre nas proximidades da estação Ponte Toropi II (Figura 9), que também soma o maior número de EEP no período de análise (345 eventos). As fotografias 8A e 8B ilustram feições erosivas do tipo voçorocas, comuns na proximidade da EM Ponte Toropi II, que têm seu início em cabeceiras

de drenagem e se desenvolvem a partir da erosão remontante. As EM Três Vendas e Fazenda Encerra apresentam 320 e 315 EEP, respectivamente, enquanto a EM Dom Pedrito concentra 292 EEP. Estas três EM localizadas na porção sudoeste da BHRSM também possuem relação com a concentração de FEL.

Figura 9 - Espacialização do número total de EEP na BHRSM e concentração dos processos erosivos lineares. O quadro em amarelo mostra a porção com maior concentração de FEL e EEP



Fonte: Elaborado pelos autores (2022).

Segundo alguns autores (NEARING et al., 1990; PIACENTINI et al., 2018), a intensidade das chuvas é um dos principais fatores que desencadeiam a erosão do solo. Especialmente,

observa-se que ocorre a concentração de FEL justamente na porção nordeste, coincidindo com a presença da EM Ponte Toropi II. Sendo assim, até o presente momento a erosão nessa porção da BHRSM foi amplamente associada ao relevo, a rochas friáveis (RADEMANN et al., 2018; PETSCH et al., 2022b; ROBAINA et al., 2022) e à erosividade (PETSCH et al., 2022a). Contudo, nesta pesquisa infere-se que os EEP também podem estar atuando nesse processo de desagregação e carreamento de sedimentos, formando sulcos, ravinas e voçorocas. Por sua vez, a presença de feições erosivas dificulta o crescimento da vegetação devido à perda de solo superficial e de matéria orgânica do solo (PHUONG et al., 2017). Dessa forma, essas áreas degradadas estarão mais suscetíveis à erosão quando ocorrer o EEP.

Por conseguinte, é importante considerar todo o conjunto de fatores atuantes no processo erosivo. Sendo assim, o fator antrópico também é um item fundamental a ser avaliado. Por um lado, a área de estudo sofre com a degradação que ocorre em função do excesso de carga animal, que é um fator de degradação para os campos sulinos (OVERBECK et al., 2009); por outro lado, Petsch et al. (2022c) destacam que houve um aumento significativo da inserção da cultura de soja na BHRSM e que há potencial de expansão para outras porções dessa mesma área. Alinhando-se esse quadro a um cenário de recorrentes EEP nos 34 anos avaliados, infere-se que a BHRSM estará sujeita a cenários de degradação do solo mais intensos no futuro.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O método empregado de P99 permitiu identificar 695 EEP na BHRSM. O uso de análises em diferentes escalas temporais possibilitou compreender o comportamento anual, sazonal e mensal dos eventos. Assim sendo, os EEP mostraram-se recorrentes na área de estudo. Os resultados sugerem que eles ocorrem a cada 3 meses aproximadamente, sendo que a cada 2 anos a BHRSM tem registro de um EEP de ≥ 130 mm.

Observou-se alguns padrões em função do ONI, sobretudo nas fases positivas (El Niño), condicionando as formações de CCM no sudeste da América do Sul. Por conseguinte, os anos com maior número de EEP, como 1997, 2002 e 2015 tiveram o registro positivo do ONI. A primavera e o outono concentram os EEP da BHRSM, justamente no período de atuação dos CCM. Evidentemente, destaca-se a necessidade de aprofundar o estudo no que diz respeito a

padrões temporais, visando descobrir se alguns dos meses ou estações sazonais demonstraram tendências de aumento ou redução de EEP.

A ocorrência sazonal e mensal dos EEP apontou para o fato de que eles podem contribuir para a degradação dos solos, já que se concentram em períodos nos quais há o plantio ou a colheita das culturas temporárias, quando o solo estará, portanto, com menor cobertura vegetal ou exposto. Como resultado, a chuva pode causar a desagregação e carreamento de material sedimentar em forma de erosão laminar e/ou linear. Outros estudos indicam que as lavouras de soja são o tipo de uso do solo que mais se expandiu nas últimas décadas na BHRSM, sendo importante, assim, estabelecer um monitoramento contínuo de perda de solos e fomentar técnicas de plantio direto com a proteção do solo usando a palha seca.

A EM Ponte Toropi II foi a que mais se destacou ao longo do estudo pelo alto número de EEP. Essa EM concentra 50% dos EEP de toda a BHRSM. Além disso, foi a que apresentou maior frequência relativa de EEP nas classes de ≥ 70 mm, ≥ 80 mm e ≥ 100 mm. Quanto ao tempo de retorno, a cada 3 meses, em média, há EEP de ≥ 70 mm, a cada 5 meses um evento de ≥ 80 mm e a cada 11 meses um EEP de ≥ 100 mm.

Especialmente, observou-se que as FEL possuem uma relação com a EM Ponte Toropi II. Assim, pode haver o desenvolvimento da erosão em função dos eventos extremos de precipitação - além do contexto formado pelo substrato arenoso pouco consolidado, pela atuação antrópica e relevo, que já configuram um cenário de fragilidade ambiental para a BHRSM. Considerando os resultados obtidos, julga-se fundamental aprofundar a pesquisa para a porção nordeste da BHRSM, buscando realizar monitoramentos regulares com a instalação de estações meteorológicas e avaliação da erosão *in loco*.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio Grande do Sul (processo 19/2551-0001234-9). O terceiro autor agradece ao CNPq pela concessão da bolsa de produtividade e pesquisa (Processo: 308228/2021-9).

REFERÊNCIAS

- ALVARES, Clayton Alcarde; STAPE, José Luiz; SENTELHAS, Paulo César; GONÇALVEZ, José Leonardo de Moraes; SPAROKEV, Gerd. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v.22, n.6, 711–728, 2013.
- ARMOND, Nubia Beray; SANT'ANNA NETO, João Lima. Entre eventos e episódios: ritmo climático e excepcionalidade para uma abordagem geográfica do clima no município do Rio de Janeiro. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 20, 2021.
- BADOR, Margot; ALEXANDER, Lisa, V.; CONTRACTOR, Steefan; ROCA, Remy. Diverse estimates of annual maximum daily precipitation in 22 state-of-the-art quasi-global land observation datasets. **Environmental Research Letters**, v. 15, 2020.
- CABRAL, Tiéle Lopes; NUMMER, Andrea Valli; BATEIRA, Carlos Valdir de Meneses Indicadores morfométricos como suporte para a classificação de voçorocas em sub-bacias hidrográficas no município de Cacequi, RS. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v.21, n.1, p.139-154, 2020.
- CARVALHO, L.M.V., JONES, C.A. A satellite method to identify structural properties o mesoscale convective systems based on maximum spatial correlations tracking technique. **Journal of Applied Meteorology**, v.40, p.1683-1701, 2001.
- COSTA, Sidney Anderson Teixeira; BEZERRA, Alan Cezar; ARAÚJO, Athos Murilio Queiroz, SILVA, Michele Ferreira da; ALVES, CRUZ, José Francisco da; Rafael Mateus; SOUZA, Luciana Sandra Bastos. Dinâmica espaço-temporal das anomalias de precipitação em uma região semiárida, Nordeste do Brasil. **Revista de Gestão de Água da América Latina**, n. 18, e14. 2021.
- DABRAL, P. P.; BAITHURI Neelakshi, PANDEY, Ashish. Soil erosion assessment in a hilly catchment of north eastern India using USLE, GIS and remote sensing. **Water Resource Management**, n. 22, p. 1783–1798, 2008.
- DE OLIVEIRA SANCHES, Fabio; VERDUM, Roberto; FISCH, Gilberto. Chuvas extremas em Alegrete (RS): um estudo sobre sua ocorrência no século XX. **Boletim Goiano de Geografia**, v. 36, p. 340-352, 2016.
- DONAT, Markus, G; LOWRY, Andrew, L.; ALEXANDER, Lisa, V.; O'GORMAN, Paul, A.; MAHER, Nicola. More extreme precipitation in the world's dry and wet regions. **Nature Climate Change**, v. 6, n. 5, p. 508-513, 2016.
- GALVANI, Emerson. Estatística descritiva em sala de aula. In: VENTURI, Luís Antonio Bittar. **Geografia: práticas de campo, laboratório e sala de aula**. São Paulo: Ed. Sarandi, 2011.
- GRIMM, Alice Marlene. Variabilidade Climática Interanual. In: CAVALCANTI, Iracema Fonseca de Albuquerque; FERREIRA, Nelson Jesuz. Clima das regiões brasileiras e variabilidade climática. 1.ed., São Paulo: Oficina de Textos, 2021.
- HEROLD, Nicholas; BEHRANGI, Ali; ALEXANDER, Lisa. Large uncertainties in observed daily precipitation extremes over land. **Journal of Geophysics Research Atmosphere**, n. 122, p. 668-681, 2016.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). Projeto RADAMBRASIL. Levantamento de recursos naturais (Folha SH.22 Porto Alegre e parte das Folhas SH.21 Uruguaiana e SI.22 Lagoa Mirim). 1. ed. Rio de Janeiro: [s.n.], 1986.

KUNKEL, Kenneth; ANDSAGER, Karen; EASTERLING, David R. Long-term trends in extreme precipitation events over the conterminous United States and Canada. **Journal of Climate**, v. 12, p. 2515-2527, 1999.

LEONARD, Michael; WESTRA, Seth; PHATAK, Alope; LAMBERT, Martins; VAN DEN HURK, Bart; MCINNES, Kathleen; RISBEY, James; SCHUSTER, Sandra; JAKOB, Doerte; STAFFORD-SMITH, Mark. A compound event framework for understanding extreme impacts WIREs. **Climate Change**, v. 5, p. 113-128, 2014.

LIMA, Karina Bruno; AQUINO, Francisco Eliseu; MORAES, Flávia Dias de Souza. Impactos gerados por dois Complexos Convectivos de Mesoescala de diferentes extensões no Sul do Brasil. **Revista Gestão e Sustentabilidade Ambiental**, v. 7, p. 186, 2018.

MACHADO, L.A.T.; ROSSOW, W.B.; GUEDES, R.L; WALKER, A.W. Life Cycle Variations of Mesoscale Convective Systems over the Americas. **Monthly Weather Review**, v.126, p.1630 – 1654. 1998.

MARENGO, José Antonio. Jato de Baixos Níveis a Leste dos Andes. In: FERREIRA, Nelson Jesus; CAVALCANTI, Iracema Fonseca de Albuquerque. **Sistemas Meteorológicos atuantes no Brasil**. 1.ed., São Paulo: Oficina de Texto, 2022.

MASROOR, Md; SAJJAD, Haroon; REHMAN, Sufia; SINGH, Roshani; RAHAMAN, Md Hibjur; SAHANA, Meheeb; AHMED, Raihan; AVTAR, Ram. Analysing the relationship between drought and soil erosion using vegetation health index and RUSLE models in Godavari middle sub-basin, India, **Geoscience Frontiers**, v. 13, n. 2, 2022.

MIHI, Ali; BENARFA, Nouredinne; ARAR, Abdelkrim. Assessing and mapping water erosion-prone areas in northeastern Algeria using analytic hierarchy process, USLE/RUSLE equation, GIS, and remote sensing. **Applied Geomatics**, n. 12, p. 179–191, 2020.

MIHI, Ali; NACER, Tarai; CHENCHOUNI, Haroun. Monitoring dynamics of date palm plantations from 1984 to 2013 using Landsat time-series in Sahara Desert oases of Algeria. In: EL-ASKARY, H. M. et al (eds) **Advances in remote sensing and geo informatics applications**. Springer Nature, Switzerland, pp 225–228, 2019.

MMBANDO, Godfrey; KLEYER, Michael. Mapping Precipitation, Temperature, and Evapotranspiration in the Mkomazi River Basin, Tanzania. **Climate**. v. 6, n. 3, p. 63, 2018.

MORAES, Flávia Dias de Souza; AQUINO, Francisco Eliseu. Desastres no Rio Grande do Sul associados a Complexos Convectivos de Mesoescala: estudo de caso do evento que ocorreu entre 22 e 23 de abril de 2011. **Revista Gestão e Sustentabilidade Ambiental**, v. 7, p. 111, 2018.

NEARING, Mark A.; DEER-ASCOUGH, L.; LAFLEN, J. M. Sensitivity analysis of the Wepp Hillslope profile erosion model, **ASAE**, n. 33, p. 0839–0849, 1990.

OGASSAWARA, Jessica Fernanda; NUNES, André Becker; RIQUETTI, Nelva. Bugoni. Eventos extremos de precipitação na bacia hidrográfica do rio Piratini: relação com ENOS e estudo de caso. **Revista Brasileira de Climatologia**, n. 28, p. 342–364, 2021.

OHBA, Masamichi; SUGIMOTO, Soichiro. Differences in climate change impacts between weather patterns: possible effects on spatial heterogeneous changes in future extreme rainfall. **Climate Dynamics**, v. 52, p. 4177–4191, 2019.

OLMO, Matías; BETTOLLI, María Laura; RUSTICUCCI, Matilde. Atmospheric circulation influence on temperature and precipitation individual and compound daily extreme events: Spatial variability and trends over southern South America. **Weather and Climate Extremes**, v. 29, 2020.

OVERBECK, Gerhard Ernst et al. Os campos sulinos: um bioma negligenciado. *In*: PILLAR, Valerio de Pata; MULLER, Sandra Cristina; CASTILHOS, Zélia Maria de Souza; JACQUES, Aino Victor Ávila. **Campos Sulinos—conservação e uso sustentável da biodiversidade**, Ministério do Meio Ambiente, Brasil, 2009. p. 26-41.

PANAGOS, Panos; BALLABIO, Cristiano; MEUSBURGUER, Katrin.; SPINONI, Jonatan; ALEWELL, Christine; BORRELLI, Pasquale. Towards estimates of future rainfall erosivity in Europe based on REDES and WorldClim datasets. **Journal of Hydrology**, n. 548, 2017.

PAZ, Cléo Maycon Viana; SANCHES, Fabio; FERREIRA, Ricardo Vicente. Chuvas em Uberaba/MG: um estudo sobre a ocorrência de eventos extremos. **Entre Lugar**, v. 10, p. 102-121, 2020.

PETSCH, Carina; SANCHES, Fábio de Oliveira; SCCOTI, Anderson Augusto Volpato; TRENTIN, Romario; ROBAINA, Luís Eduardo de Souza; AMARAL, Eduardo Cunha do. Erosividade da bacia hidrográfica do rio Santa Maria (RS): tendências e espacialização. **Boletim de Geografia**, v. 39, p. 348-368, 2022a.

PETSCH, Carina; SCCOTI, Anderson Augusto Volpato; ROBAINA, Luís Eduardo de Souza; TRENTIN, Romario. Controlling factors and mapping of linear erosive features in Santa Maria river watershed –RS. **Revista Brasileira De Geomorfologia**, v. 23, n. 4, p. 1876–1892, 2022b.

PETSCH, Carina; SCCOTI, Anderson Augusto Volpato; TRENTIN, R.; SCCOTI, Anderson Augusto Volpato; ROBAINA, Luís Eduardo de Souza; ROSA, Kátia Kellem. A expansão da cultura de soja no pampa gaúcho: o caso da bacia hidrográfica do rio Santa Maria. **Geografar**. v. 56, p. 162-181, 2022c.

PETSCH, Carina; AMARAL, Eduardo Cunha; SANCHES, Fabio de Oliveira; TRENTIN, R.; SCCOTI, Anderson Augusto Volpato; ROBAINA, Luís Eduardo de Souza; ROSA, Kátia Kellem. Relação entre a seca e erosão do solo na formação campestre da bacia hidrográfica do rio Santa Maria (RS). **RAEGA - O espaço geográfico em análise**. v. 56, p. 162-181, 2023.

PHUONG, Tran Thi; SHRESTHA, Rajendra Prasad; CHUONG, van Huynh. **Chapter 6 - Simulation of Soil Erosion Risk in the Upstream Area of Bo River Watershed** *In*: THANG, Tran Nam; DUNG, Ngo Tri; HULSE, David; SHARMA, Shubhechchha; SHIVAKOTI, Ganesh P. *Redefining Diversity & Dynamics of Natural Resources Management in Asia*, v. 3, Elsevier, p. 87-99, 2017.

PIACENTINI, Tommaso; GALLI, Alberto; MARSALA, Vincenzo; MICCADEI, Enrico. Analysis of Soil Erosion Induced by Heavy Rainfall: A Case Study from the NE Abruzzo Hills Area in Central Italy. **Water**, n. 10, p. 1314, 2018.

PRISTO, Marcus Vinícius de Jesus; DEREZYNSKI, Claudine Pereira; SOUZA, Pedro Regoto. Climatologia de Chuvas Intensas no Município do Rio de Janeiro. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.33, v.4, 615-630, 2018.

PRIYA, Vishnu, M. S.; AGILAN, V. Evaluation of change factor methods in downscaling extreme precipitation over India, **Journal of Hydrology**, v. 614, 2022.

RADEMANN, Lucas Krein; TRENTIN, Romario; ROBAINA, Luís Eduardo de Souza. Relação das variáveis ambientais com os processos erosivos no município de Cacequi, Rio Grande do Sul. **Revista Georaguaia**. v. 8 n. 2, 2018.

RENARD, Kenneth G.; FOSTER, G. R.; WEESIES, G. A.; MCCOOL, D. K.; YODER, D. C. Predicting Soil Erosion by Water: A Guide to Conservation Planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE). **Agriculture Handbook**, 703. USDA, Washington, 1997.

ROBAINA, Luis Eduardo de; TRENTIN, Romario; SCCOTI, Anderson Augusto Volpato; PETSCH, Carina. Utilização da Análise Hierárquica Ponderada em Atributos do Relevo para o Zoneamento de Suscetibilidade a Voçorocamentos na Bacia Hidrográfica do Rio Santa Maria/RS. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 15, n. 2, p. 994-1008. 2022.

ROBAINA, Luis Eduardo de; TRENTIN, Romario; LAURENT, François; SCCOTI, Anderson Augusto Volpato. Zoneamento morfolitológico da bacia hidrográfica do rio Ibicuí e sua relação com processos superficiais e o uso do solo. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 16, n. 1, p. 63-77, 2015.

ROJPRATAK, Sawitree, SUPHARATID, Seree. Regional extreme precipitation index: Evaluations and projections from the multi-model ensemble CMIP5 over Thailand. **Weather and Climate Extremes**. v. 37, 2022.

ROSSATO, Maíra Suertegaray. **Os climas do Rio Grande do Sul: variabilidade, tendências e tipologia**. 2011. Tese (Doutorado em Geografia) Programa de Pós-Graduação em Geografia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 2011. 240p.

RUHI, Albert; MESSENGER, Mathis; OLDEN, Julian, D. Tracking the pulse of the Earth's fresh waters. **Nature Sustainability**, v.1, p. 198-203, 2018.

SANCHES, Fabio, VERDUM, R.; FISCH, Gilberto. Tendência de Longo Prazo das Chuvas Diárias no Sudoeste do Rio Grande do Sul: os Eventos Extremos e a Arenização. **Revista Brasileira de Geografia Física**, n. 7(6), p. 1100-1109, 2015.

SANCHES, Fabio; VERDUM, Roberto; FISCH, Gilberto; GASS, Sidnei Luís Bohn.; ROCHA, Vinicius. Extreme rainfall events in the Southwest of Rio Grande do Sul (Brazil) and its association with the Sandization process. **American Journal of Climate Change**, v. 08, p. 441-453, 2019.

SANTOS, Denise Dias dos; GALVANI, Emerson. Proposta para determinação de eventos extremos de chuva no litoral norte paulista. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 25, 2019.

SCCOTI, Anderson Augusto Volpato. **Estudo e zoneamento geoambiental com auxílio de sig na bacia hidrográfica do Rio Santa Maria: sudoeste do Estado do Rio Grande do Sul**. 2017. Tese (Doutorado em Geografia) Programa de Pós-Graduação em Geografia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 2017. 153p.

SILVEIRA, Renata Dias. Risco climático e vulnerabilidade socioespacial: o exemplo dos eventos extremos relacionados ao calor e ao frio. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 19, 2021.

TAVARES, Matheus Gomes; SANTOS, Eliane Barbosa. Período de retorno das precipitações máximas diárias no estado do Rio de Janeiro. **Revista Brasileira de Climatologia**, n. 30(18), p. 274–290, 2022.

TEIXEIRA, Mateus da Silva; PRIETO, Raidel Báez. Eventos Extremos de Chuva no Estado do Rio Grande do Sul, Brasil, entre 2004 e 2013. Parte 1: Definição dos Eventos e Estatísticas. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 35, n. 1, p. 45-52, 2020.

TERASSI, Paulo Miguel de Bodas; BIFFI, Vitor; GALVANI, Emerson; OLIVEIRA-JÚNIOR, Jose. Estimativas de erosividade e as precipitações extremas diárias na bacia hidrográfica do Alto Iguaçu - Paraná. **Revista Brasileira de Climatologia**. 25. 241-265, 2019.

THOMASSEN, Emma. et al. Differences in representation of extreme precipitation events in two high resolution models. **Climate Dynamics**, n. 57, p. 3029–3043, 2021.

TUCCI, Carlos Eduardo Morelli. **Hidrologia: Ciência e aplicação**. ABRH, Porto Alegre, 1997.

VIANA, Denilson Ribeiro; AQUINO, Francisco Eliseu; BURGOBRAGA, Ricardo; FERREIRA, Nelson Jesus. Mesoscale convective complexes in Rio Grande do Sul between October and December of 2003 and associated precipitation. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 24, p. 276-291, 2009.

VRIELING, Anton. Satellite remote sensing for water erosion assessment: A review. **CATENA**, v. 65, n. 1, p. 2-18, 2006.

WANDERLEY, Lucas Suassuna de Albuquerque; NÓBREGA, Ranyere, Silva; MOREIRA, Ayobami Badiru; ANJOS, Rafael Silva; ALMEIDA, Caio Américo Pereira de. As chuvas na cidade do Recife: uma climatologia de extremos. **Revista Brasileira de Climatologia**, n. 22, 2021

WANG, Dingkui; DONG, Zengchuan; LING, Zihan; JIANG, Feiqing; ZHU, Shengnan; CHEN, Jian. Spatiotemporal variability of extreme precipitation at different time scales and quantitative analysis of associated driving teleconnection factors: Insights from Taihu Basin, China, **Ecological Indicators**, v. 142, 2022.

WILDNER, Wilson; RAMGRAG, Gilberto Emílio; LOPES Ricardo da Cunha; IGLESIAS, Carlos Moacyr da Fontoura. Mapa Geológico do Estado do Rio Grande do Sul. Escala 1:750000. CPRM, Serviço Geológico do Brasil. Porto Alegre, RS. 2006.

XU, Chong-yu. Issues influencing accuracy of hydrological modeling in a changing environment. **Water Science and Engineering**, v. 14 (2), p. 167-170, 2021.

ZHANG, Ling; REN, Dong; NAN, Zuothong; WANG, Weizhen; ZHAO, Yi; ZHAO, Yanbo; MA, Qimin; WU, Xiabo. Interpolated or satellite-based precipitation? Implications for hydrological modeling in a meso-scale mountainous watershed on the Qinghai–Tibet Plateau. **Journal of Hydrology**, 583, p. 124629, 2020.

ZHANG, Xuexian; SONG, Jinxi; WANG, Yirui; SUN, Haotian; LI, Qi. Threshold effects of vegetation coverage on runoff and soil loss in the Loess Plateau of China: A meta-analysis. **Geoderma**, v. 412, 2022.

ZSCHEISCHLER, Jakob et al. Future climate risk from compound events. **Nature Climate Change**, n. 8 (6), p. 469-477, 2018.