



ÁGUAS DE MARÇO: ORIGEM E EXCEPCIONALIDADE DE EVENTO EXTREMO DE PRECIPITAÇÃO OCORRIDO NA SERRA DO MAR PARANAENSE

*Águas de Março: origin and exceptionality of an extreme
precipitation event registered in the southern portion of Serra do
Mar*

*Águas de Março: origen y excepcionalidad de un evento de lluvia
extrema registrado en la región paranaense de la Serra do Mar*

Ana Carolina Sanches de Angelo  

Universidade Federal do Paraná – UFPR, Departamento de Geografia
Laboratório de Hidrogeomorfologia – LHG UFPR
sanchesdeangelo@gmail.com

Pedro Augusto Breda Fontão  

Universidade Federal do Paraná – UFPR, Departamento de Geografia
Laboratório de Climatologia – Laboclima UFPR
pedrofontao@yahoo.com.br

Irani dos Santos  

Universidade Federal do Paraná – UFPR, Departamento de Geografia
Laboratório de Hidrogeomorfologia – LHG UFPR
irani@ufpr.br

Resumo: A dinâmica meteorológica e hidrogeomorfológica da Serra do Mar paranaense implica em riscos à ocupação, demandando estudos acerca destes temas. Entre os dias 8 e 14 de março de 2011 foram registrados 406,4 mm de precipitação no município de Morretes-PR, onde se localiza a bacia hidrográfica do rio Jacareí. Conhecido como “Águas de Março”, o evento desencadeou escorregamentos e fluxos de detritos. A suscetibilidade da bacia aos movimentos gravitacionais de massa é bastante discutida na literatura, o que não ocorre em relação à precipitação extrema observada. Este trabalho descreve e analisa estes eventos pluviométricos, levantando aspectos de gênese e magnitude que o tornaram excepcional. O estudo se deu por meio de análise de dados meteorológicos, cartas sinóticas, imagens de sensores embarcados em satélites geoestacionários e produtos de reanálise climática. As análises indicam que a singularidade do evento está associada à duração (143 horas) e ao acumulado (406,4 mm) mais do que às intensidades máximas horárias

(42,6 mm/h). Foram identificados aportes de umidade de oeste e do oceano, influenciados pela ocorrência de um cavado com a formação de um corredor de umidade sobre a região. Anticiclones periféricos e umidade deslocada ao sul a partir da região de atuação da ZCAS também contribuíram para a persistência da precipitação. Concluiu-se que a longa duração está associada à simultaneidade de atuação entre estes sistemas atmosféricos com indícios de influência da orografia, demandando atenção do monitoramento quanto à coincidência de sistemas similares na região, à luz das mudanças climáticas.

Palavras-chave: Chuva extrema. Análise de dados meteorológicos. Cavado. Monitoramento hidrometeorológico.

Abstract: The meteorological and hydrogeomorphological characteristics of the Serra do Mar mountain range implies risks to its occupation, creating a demand for studies regarding the region's environmental dynamics. In the summer of 2011, from March 11 to 14, 406,4 mm of rainfall were registered in the town of Morretes (Paraná-Brasil), where the Jacareí river watershed is located. Landslides and Debris Flows happened as a consequence of this extreme event, known as "Águas de Março". The region's susceptibility to mass movements is widely discussed, as opposed to the approaches regarding the rainfall observed then. In the present study, we investigate that precipitation episode, explaining the aspects of origin and magnitude that made it exceptional. This was assessed through the analysis of meteorological data, synoptic charts, and remote sensing and climatic reanalysis products. We propose that the event's singularity was associated with its long duration (143 hours) and accumulated rainfall (406,4 mm) more than with the maximum rainfall intensities observed (42,6 mm/h). The images led to the identification of moisture transport from the west at high levels and the ocean at low levels, both influenced by a trough. Peripheral anticyclones and moisture displaced from the South Atlantic Convergence Zone also contributed to this scenario. Therefore, the event's long duration is related to the force of those multiple atmospheric systems, with signs of some orographic influence. We conclude that the coincidence of occurrence of the described systems deserves special monitoring attention, considering climate change.

Keywords: Extreme rainfall. Meteorological data analysis. Trough. Hydrometeorological monitoring.

Resumen: La dinámica meteorológica e hidrogemorfológica de la Serra do Mar resulta en riesgos, por lo que se necesitan estudios sobre estos temas en la región. Entre 8 y 14 de marzo de 2011 se registraron 406,4 mm de precipitación en Morretes-PR, cerca la cuenca hidrográfica del río Jacareí (Serra do Mar – Sur de Brasil). Tras el evento – conocido como "Águas de Março" - ocurrieron deslizamientos de tierra y flujos de detritos. La susceptibilidad del terreno a los movimientos de masa fue bastante discutida, lo contrario a lo que ocurre respecto a la precipitación observada. El presente estudio describe y analiza este evento de lluvia considerando los aspectos de origen y magnitud que lo hicieron excepcional. La investigación se hizo por medio de análisis de datos meteorológicos, cartas sinópticas, imágenes de satélites y productos de reanálisis climático. Los análisis muestran que la singularidad del evento reside en la larga duración (143 horas) y en la gran acumulación pluviométrica (406,4 mm) más que en las intensidades horarias observadas (42,6 mm/h). Fueron identificados aportes de humedad del oeste en altos niveles y del océano en bajos niveles, influenciados por una vaguada. Anticiclones periféricos y humedad desplazada a sur desde la Zona de Convergencia del Atlántico Sur también contribuyeron para la persistencia de la precipitación. Se concluye que la larga duración del evento está asociada a la simultaneidad de distintos sistemas con pistas de la influencia de la orografía, por lo que se necesita especial atención de monitoreo considerando el cambio climático.

Palabras clave: Lluvia extrema. Análisis de datos meteorológicos. Vaguada. Monitoreo hidrometeorológico.

Submetido em: 24/01/2022

Aceito para publicação em: 08/08/2022

Publicado em: 24/08/2022



1. INTRODUÇÃO

No período entre 1920 e 2020, o Brasil foi o 7º país do mundo em recorrência de desastres climatológicos e o 6º em recorrência de desastres hidrológicos, conforme dados do EM-DAT, base global do *Centre for Research on Epidemiology of Disasters* (CRED, 2021). No país, os desastres naturais mais frequentes e com impactos mais expressivos à sociedade estão associados às precipitações ou às estiagens, conforme conceitos de desastres dispostos na codificação brasileira (BRASIL, 2012). Eles ocorrem sobretudo na faixa de aproximadamente 600 km ao longo da costa do Brasil, porção de maior densidade populacional (IBGE, 2020). Inserida neste contexto espacial, a Serra do Mar é uma das paisagens do país mais impactadas pela incidência de tempestades severas com alto potencial para deflagração de desastres (HADER, 2020; VIEIRA et al., 2019; TAVARES E FERREIRA, 2020; ZAI et al., 2017; TAVARES E MENDONÇA, 2017). Neste artigo discute-se a gênese e a magnitude do evento extremo de maior expressividade já registrado na Serra da Prata - uma porção paranaense da Serra do Mar - ocorrido em março de 2011.

Um evento de precipitação é considerado extremo quando a intensidade, a duração ou o acumulado têm valores expressivos e atípicos para uma determinada região. Alguns dos métodos mais utilizados para esta definição consideram a distribuição das frequências de acumulados de chuva em uma série histórica de dados e a excedência de um limiar percentual. São exemplos os episódios em que o registro pluviométrico de um único dia supera o acumulado em 99 ou 95% dos outros dias da série (USGCRP, 2021; EPA, 2020).

É recorrente também que a chuva seja classificada em cada local qualitativamente a partir da intensidade registrada, forma mais acessível ao público não especializado. Algumas classificações desse gênero podem ser observadas na Tabela 1.

Tabela 1- Exemplos de categorias de classificação da precipitação por intensidade.

Instituição	Categorias			
IPMA (2021) (Aguaceiro)	Fraco	Moderado	Forte	Violento
	<2 mm/h	>2 e <10 mm/h	>10 e <50 mm/h	>50 mm/h
WMO (2004)	Fraca	Moderada	Forte	Violento
	<2,5	>2,5 e <10 mm/h	>10 e <50 mm/h	>50 mm/h
Alerta RJ (2020)	Fraca	Moderada	Forte	Muito Forte
	<5 mm/h	>5 e <25 mm/h	>25,1 e <50 mm/h	>50 mm/h
Protección Civil de España (2020)	-	-	Forte	Muito Forte
		>15 e <30 mm/h	>30 e <60 mm/h	Torrencial >60 mm/h

A origem de eventos extremos de chuva pode estar associada a mecanismos de circulação atmosférica de escalas variadas e/ou a convergência de fenômenos distintos, podendo implicar em precipitações excepcionalmente intensas (GARREAUD E ACEITUNO, 2007). Conforme levantamento realizado por Reboita et al. (2010) há diversos sistemas atmosféricos que atuam sobre a região sudeste do continente sulamericano. Dentre outros processos, os autores destacam: os aportes feitos pelos jatos de baixos níveis (JBNS), eventualmente associados a complexos convectivos de mesoescala (CCMs); as linhas de instabilidade pré-frontais; os bloqueios atmosféricos; as nuvens vírgula-invertida; e a brisa marítima e as regiões ciclogênicas ao longo da costa austral brasileira. Garreaud e Aceituno (2007) também destacam a importância da vegetação e de feições topográficas como a cordilheira Andina, que influencia na circulação troposférica e os oceanos Pacífico e Atlântico que estabelecem condições de contorno para os sistemas atuantes sobre o continente. Finalmente, a Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) também exerce bastante influência nos regimes de precipitação, sobretudo na região sudeste do Brasil, estando ligada a eventos extremos de precipitação (BERNARDINO et al., 2018).

Alguns desses processos são acentuados durante o verão, época em que o aquecimento do continente promove maior convecção geradora de nebulosidade, especialmente em áreas quentes e com grande disponibilidade hídrica. Além dos oceanos, são exemplos destes locais algumas regiões continentais como a Amazônia, o Pantanal e o Chaco. Reboita et al. (2010) e Teixeira e Satyamurty (2006) destacam que jatos de norte ocorrem



eventualmente ao mesmo tempo em que jatos de altos níveis de oeste. A combinação entre ambos direciona os sistemas gerados a leste dos Andes para a região sul do Brasil, como também colocam Junquas et al. (2016) e Montini et al. (2019). Nesta época são recorrentes os CCMs na região centro oeste da América do Sul, que tendem a se deslocar para leste ou sudeste. Em estudo mais recente, Cardoso et al. (2020) concordam com a existência desses mecanismos e ainda destacam a importância de zonas de baixa pressão – como os cavados – para a atuação dos sistemas na região Sul. Como condições limitantes à atuação desses sistemas colocam-se ainda os bloqueios atmosféricos que costumam ocorrer no entorno da região (Rodrigues e Woollings, 2016).

Conforme Vanhoni e Mendonça (2008), no caso da porção litorânea da região Sul do Brasil, o transporte de umidade do oceano tem grande relevância, acentuando as condições favoráveis à incidência de chuvas prolongadas e intensas, principalmente em baixos níveis. Terassi e Galvani (2017) também destacam o aporte da maritimidade na região, não dissociando-a da importância da Serra do Mar como fator topográfico de influência sobre a circulação atmosférica local.

Além dos mecanismos de circulação, estudos em todo o mundo indicam a relevância da orografia para a amplitude térmica e para a precipitação. Lin et al. (2001), por exemplo, levantaram aspectos sinóticos e de mesoescala relacionados à chuva orográfica em regiões da China, dos Estados Unidos e da Europa. Entre os fatores identificados, destacam-se: a moção vertical de alto potencial carregando umidade forçosamente para cima; a preexistência de um sistema convectivo com pouca ou nenhuma mobilidade; e a instabilidade condicional ou potencial de um fluxo movendo-se para montante. Além disso, os autores destacam a recorrência do encontro dos jatos de baixos níveis com a orografia, e a associação deste processo com a ocorrência de chuvas muito intensas nas regiões estudadas. No Brasil, Grimm (2019) indica também a importância da topografia para a convergência em baixos níveis.

A precipitação extrema de grande intensidade em escala subdiária pode estar associada a quaisquer destes fatores supracitados. Já as precipitações extremas associadas a chuvas de longa duração tendem a estar associadas à ocorrência simultânea de diversos desses mecanismos. Situações análogas foram observadas por Kang et al. (2019) quanto à ocorrência simultânea de cavados ligados a ventos de oeste, as correntes de jato e a orografia; e por Goswami et al. (2010), na relação entre sistemas multiescalares e a topografia, com a

persistência da chuva. Na região da Serra do Mar paranaense concorrem todas os fatores acima descritos implicando na chegada e na estacionariedade de massas úmidas sobre a região (DE MELLO et al., 2017). Neste contexto complexo, destacam-se algumas ferramentas de análise hoje empregadas em escala local e regional como os dados de monitoramento pontual; ou modelos regionais (AMBRIZZI ET AL. (2018)), como o Eta, por exemplo (MESINGER, 1984; CHOU, 1996).

Um caso notório de chuva extrema ocorreu em 11 de março de 2011 na bacia hidrográfica do rio Jacareí – delimitada a leste pela Serra da Prata, porção paranaense da Serra do Mar. Desencadearam-se escorregamentos e houve grande mobilização de blocos e detritos lenhosos, conduzidos por forte fluxo de água e sedimentos (Figura 1 a).

O episódio – nomeado de Águas de Março a partir de operação da Defesa Civil paranaense - provocou grande transformação na paisagem da bacia com evidências da reescavação de leitos fluviais e consequências infra estruturais como a queda da ponte da rodovia BR-277 (Figura 1 b).

Figura 1 - a) Registro pós-evento b) Ponte da BR 277 sentido leste destruída.



Fonte: AEN (2011).

Após o ocorrido foram desenvolvidas diversas pesquisas na região, constituindo-se assim um importante banco de dados sobre a região da Serra da Prata e os movimentos gravitacionais de massa (BUENO, 2015; FOLADOR et al., 2018; LOPES et al., 2015; MELO et al., 2015; MARTINS et al., 2012; PINTO et al., 2012, 2015 e 2014; SATO et al., 2017; SILVA et al., 2012; SILVEIRA et al., 2013, 2012 e 2014; STURION, 2013; TANAKA et al., 2015). Estes levantamentos destacam sobretudo que as condições geológicas e geomorfológicas da região contribuem para a suscetibilidade do terreno a estes fenômenos. Entretanto, apesar de



constituir o fator deflagrador deste episódio, a precipitação observada na ocasião permanece como tema pouco explorado na literatura. Até o momento de finalização deste estudo em 2021, destaca-se apenas a publicação de De Mello et al. (2017) como abordagem mais específica sobre a precipitação extrema associada ao episódio Águas de Março na região.

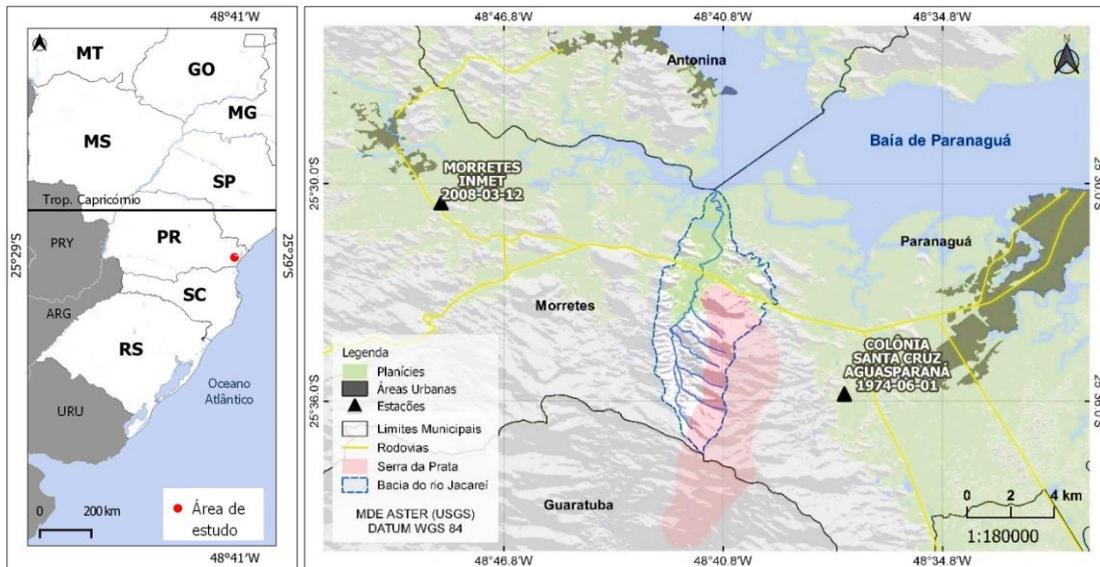
Conhecimentos acerca da gênese, da frequência e da magnitude dos eventos de precipitação são relevantes para o entendimento da dinâmica hidrogeomorfológica do episódio e das respostas locais possíveis às chuvas extremas. Nesse âmbito, constituem dados relevantes os modelos climáticos regionais, as imagens oriundas de sensoriamento remoto, as cartas sinóticas e os dados de precipitação obtidos em superfície. Com a existência de perspectivas e tendências de agravamento da precipitação na região (ÁVILA et al., 2016; NASCIMENTO et al. 2020; DE MELLO et al., 2017; REGOTO et al., 2021; QUADROS et al., 2019), com os efeitos ainda desconhecidos das mudanças climáticas no local e com a expansão dos centros urbanos sobre áreas de perigo, este estudo torna-se relevante para a gestão territorial e de risco de desastres na Serra do Mar paranaense. Portanto, em relação ao episódio Águas de Março ocorrido na bacia hidrográfica do rio Jacareí, os objetivos deste estudo são: a identificação da gênese atmosférica e a caracterização da magnitude e da excepcionalidade da precipitação ocorrida.

2. METODOLOGIA

2.1. Área de Estudo

A bacia hidrográfica do rio Jacareí localiza-se na divisa entre os municípios paranaenses de Morretes e Paranaguá e é cruzada pela rodovia BR-277, que conecta a capital Curitiba ao litoral. O mapa disposto na Figura 2 ilustra alguns destes aspectos, além da localização de dois postos de monitoramento pluviométrico geridos por instituições públicas nas proximidades. Dentro dos limites da bacia hidrográfica do rio Jacareí, o monitoramento hidrometeorológico teve início apenas após o episódio de 2011, e encerrou-se em 2015, sendo reativado por iniciativa privada posteriormente.

Figura 2 – Cartograma e mapa de localização da área de estudo.



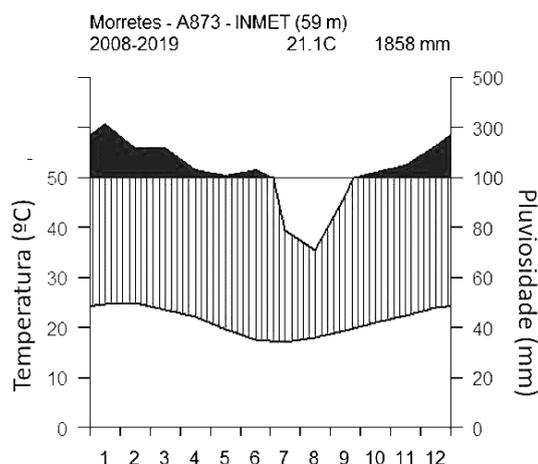
Fonte: MDE – Imagem ASTER (USGS, 2019); Limites (ITCG E IBGE, 2019); Rodovias (DER, 2018); Bacia (AGUASPARANÁ, 2018); Estações (ANA, 2018); Áreas Urbanas (IBGE, 2021) - dados.

Conforme a classificação de Köppen, o clima da bacia corresponde ao tipo subtropical úmido com inverno fresco a frio (Cfa) e ao clima subtropical úmido com inverno frio (Cfb) – predominante acima dos 700 metros de altitude (SIMEPAR e ITCG, 2006; VANHONI E MENDONÇA, 2008). Com relação à pluviosidade, esta é a região mais chuvosa do estado do Paraná onde o acumulado pluviométrico varia entre 2000 e 2400 mm anuais, conforme recentes normais climatológicas e observações históricas (IAPAR, 2019; MAACK, 1968). A Figura 3 apresenta um climograma de uma estação local do INMET que expressa as médias mensais na série histórica indicando os meses de maior pluviosidade e disponibilidade hídrica, correspondentes aos meses de verão.

Indica-se nas áreas preenchidas da Figura 3 os meses em que a pluviosidade mensal excede os 100 mm, o que ocorre na maior parte do ano. O período mais chuvoso, de novembro a março é a época em que são mais recorrentes os registros de movimentos gravitacionais de massa na região. A vegetação do local é característica da floresta ombrófila densa. Há larga presença de depósitos de tálus e colúvios que diminuem em espessura a montante nas vertentes (MINEROPAR, 2006; SILVEIRA et al., 2012).



Figura 3 - Climograma elaborado com base nos dados da Estação Morretes A873 – INMET.



Fonte: INMET (2019) – dados; Guijarro (2019) – ferramenta.

2.2. Circulação Atmosférica

Com o objetivo de compreender a gênese atmosférica do evento extremo de precipitação a que foi submetida a bacia hidrográfica do rio Jacareí em março de 2011, foram analisadas 23 cartas sinóticas de superfície correspondentes aos momentos de maior intensidade de precipitação registrados no entorno do local. Estes momentos correspondem ao período entre as 21 horas do dia 08/03/2011 e as 15 horas do dia 14/03/2011, em horário local e com intervalos de 6 horas entre as imagens (CPTEC, 2021). Da mesma forma, foram observados os boletins meteorológicos dos períodos correspondentes.

Além das cartas sinóticas, foram analisadas imagens de sensores do satélite geoestacionário GOES-12 – dentre os melhores disponíveis à época. As imagens foram obtidas através da plataforma do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (CPTEC, 2021). A análise deste material correspondeu ao período entre 07 a 14 de março de 2011. Em relação às imagens GOES-12 foram analisados dados de imageamento dos canais 2, 3, 4 e de composições coloridas. Respectivamente, eles evidenciam a circulação em baixos níveis; a presença de vapor d'água em altos níveis e ventos; a precipitação e a nebulosidade. Como complemento a estas imagens, foram coletados e utilizados dados de Reanálise Climática gerados pela *National Centers for Environmental Prediction / National Center for Atmospheric Research* (NCEP/NCAR) e pelo *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts* (ECMWF), para diversas variáveis.

Ainda, utilizaram-se imagens do sensor MODIS providas pelo Serviço Geológico dos Estados Unidos da América (USGS, 2019). Os produtos deste sensor têm 1 km de resolução espacial, e vêm sendo utilizados em análises de possíveis indícios das influências da orografia sobre a atuação dos sistemas atmosféricos (SMITH e EVANS, 2007; VAN NIEKERK, et al. 2018; SMITH, 2006).

Como forma de validação dessas informações por instrumentos na superfície, foram selecionadas por meio de ferramenta de filtragem do INMET informações sobre as cinco maiores máximas de chuva acumulada diária para todo o território brasileiro nos dias 11, 12 e 13 de março de 2011. A ferramenta tem como base as 466 estações automáticas geridas pelo INMET em território nacional à época – ano de 2011.

2.3. Evento Extremo de Precipitação

Em relação à compreensão da magnitude do evento, frente ao histórico de precipitação na bacia, foram tratados e analisados os dados do posto pluviométrico “Colônia Santa Cruz” em atividade desde junho de 1974. Este posto localiza-se no sopé da face leste da Serra da Prata, a aproximadamente 5,5 km das vertentes onde ocorreram os principais escorregamentos na bacia do rio Jacareí conforme a Figura 2. Essa estação é convencional e possui registros diários. Anteriormente, ela era administrada pelo ÁGUASPARANÁ, hoje incorporado ao Instituto Água e Terra, autarquia estadual paranaense.

Os dados do posto Colônia Santa Cruz são suficientes para evidenciar a singularidade do Águas de Março em relação ao contexto histórico da bacia. Contudo, dados diários não possuem descrição temporal suficiente para o detalhamento da intensidade horária da precipitação. Esta avaliação é importante, uma vez que episódios de chuva muito intensa têm maior possibilidade de contribuição como deflagradores de desastres ou estopins de situações de umidade (REID et al., 1997), o que é mais bem observado numa escala horária.

Dessa forma, observaram-se os dados horários da estação meteorológica Morretes - A873 (INMET, 2021) instalada em 2008 e localizada próximo ao centro da cidade de Morretes, a aproximadamente 10 km do rio Jacareí (Figura 2). Os registros avaliados têm início em 13 de março de 2008 e final em 30 de junho de 2019, e compreendem as variáveis pressão



atmosférica (hPa), radiação global (KJ/m²), precipitação (mm), temperatura do ar (°C), umidade relativa do ar (°C), direção do vento (°) e velocidade do vento (m/s).

As análises das séries de dados das estações foram desempenhadas por meio da linguagem R. Da mesma forma foi criado um subconjunto de dados cujos registros correspondem aos eventos de precipitação considerados em blocos, com registros do acumulado e da duração do evento desde o início (precipitação acima de 1 mm) até o término. Para isto, utilizou-se o critério de 6 horas de período seco como marco da separação entre dois eventos pluviométricos, conforme proposto por Huff (1967). O estabelecimento dos eventos de chuva possibilitou a análise deles sob aspectos como a intensidade média e máxima, a duração e o acumulado pluviométrico. Os episódios associados ao evento Águas de Março foram analisados a partir de técnicas de estatística descritiva e comparados de acordo com a sazonalidade das chuvas. Analisaram-se a precipitação horária e os eventos singularizados de chuva; o acumulado e a intensidade de toda a série, com destaque para o período entre 7 e 13 de março de 2011.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Gênese do Evento Extremo de Precipitação

Apesar do destaque ganhado pelo evento extremo na bacia do rio Jacaré e dos graves impactos ali provocados, há registro de chuvas volumosas em outras localidades da região Sul. São exemplos os 240,4 mm precipitados entre os dias 10 e 11 de março (48 hrs) em Rio Grande-RS e 113 mm registrados no dia 13 de março em Florianópolis. A Tabela 2 dispõe dos dados de máximas diárias para algumas localidades do Brasil, conforme as estações do INMET, e serve à comparação entre os dados das observações remotas e as observações do monitoramento em superfície.

Tabela 2 - Máximas diárias registradas nos pluviômetros do INMET no Brasil.

DIA 10/03/2011		DIA 11/03/2011		DIA 12/03/2011		
ESTAÇÃO INMET	Valor (mm)	ESTAÇÃO INMET	Valor (mm)	ESTAÇÃO INMET	Valor (mm)	
1	RIO GRANDE-RS	132.5	RIO GRANDE-RS	107.9	MORRETES-PR	268.4
2	ITACOATIARA-AM	115.0	RIO GRANDE-RS	106.6	PARANAGUA-PR	159.0
3	PRESIDENTE FIGUEIREDO-AM	110.6	TRIUNFO-RS	99.5	MARINGA-PR	127.2
4	RIO GRANDE-RS	107.0	MORRETES-PR	98.8	MARINGA-PR	122.6
5	ITAPETINGA-BA	105.6	PARANAGUA-PR	84.0	MARABA-PA	122.4

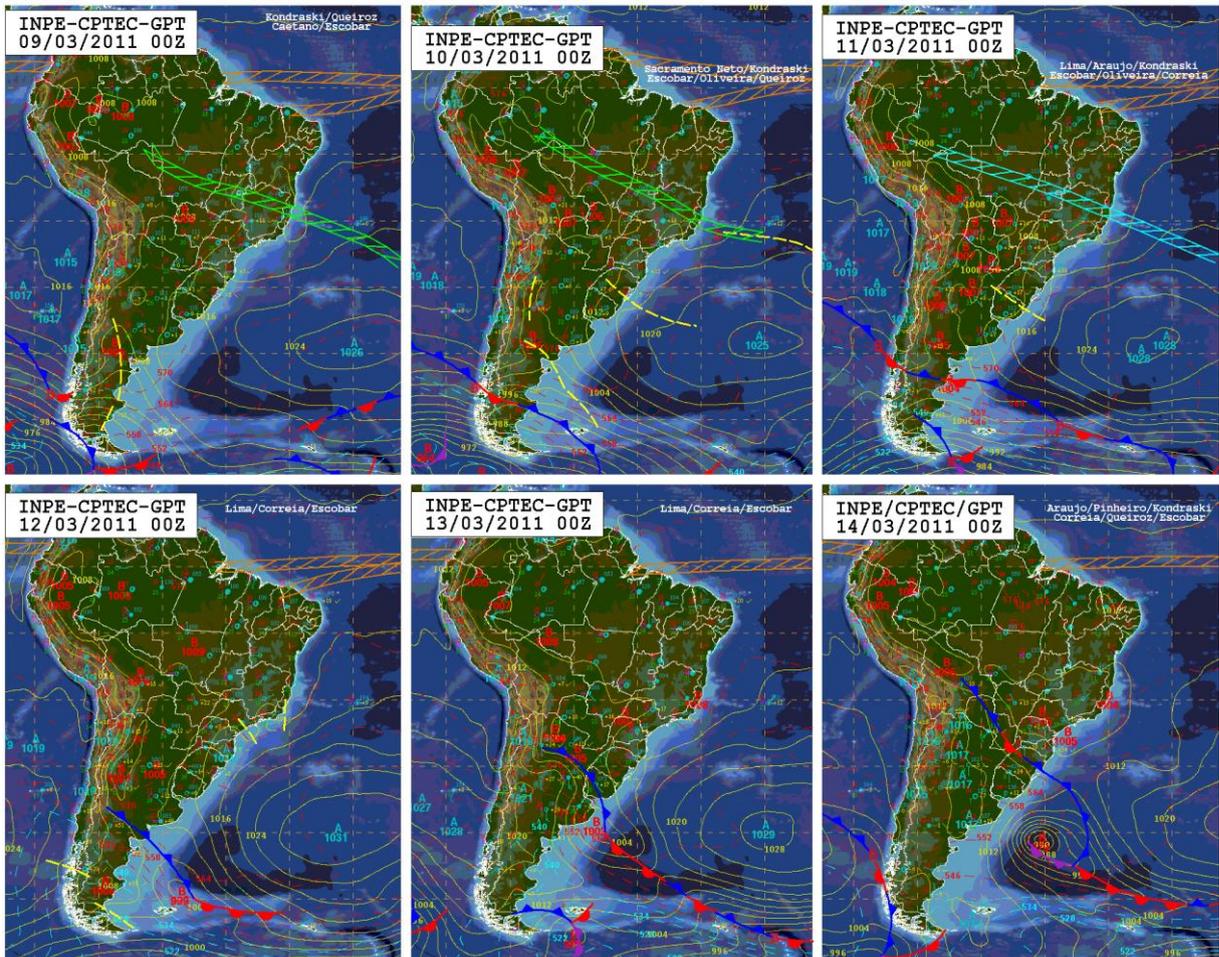
A despeito da diversidade climática brasileira, nota-se que as chuvas na região Sul tiveram relevância nestes três dias, com volumes expressivos que superaram os demais registros no país. Conforme previsto, o pluviômetro localizado em Morretes registrou o maior volume de chuva entre todas as estações do INMET no dia 12. A seguir são detalhadas algumas das observações feitas sobre dados do evento e da observação de cartas sinóticas (superfície) e imagens de satélite em sequência cronológica, dispostas nas Figuras 4 (registros sinóticos em superfície), 5 (imagens do satélite GOES-12), 6 e 7 (produtos de reanálise) e 8 (imagem do satélite MODIS).

As imagens da Figura 4 indicam no início da tarde do dia 10 a formação de nebulosidade sobre Rio Grande do Sul e Santa Catarina, evidenciando a intensificação da atuação de um cavado (linha amarela pontilhada) sobre a região.

Já nesta fase nota-se o aporte de umidade do oceano ao sistema, além de ventos oriundos de oeste, com possível influência de um sistema de baixa pressão atmosférica na região do Chaco, do Paraguai e do norte da Argentina (Massa Tropical Continental). A atuação das células anticiclônicas, e em especial o Anticiclone do Atlântico Sul, favoreceu a permanência da nebulosidade sobre a região Sul do país, exercendo força contrária à dispersão do sistema que poderia ter ocorrido com os ventos de oeste. Estas condições provocaram já entre os dias 10 e 11 acumulados de precipitação superiores a 100 mm em 24h no Rio Grande do Sul e em Santa Catarina.



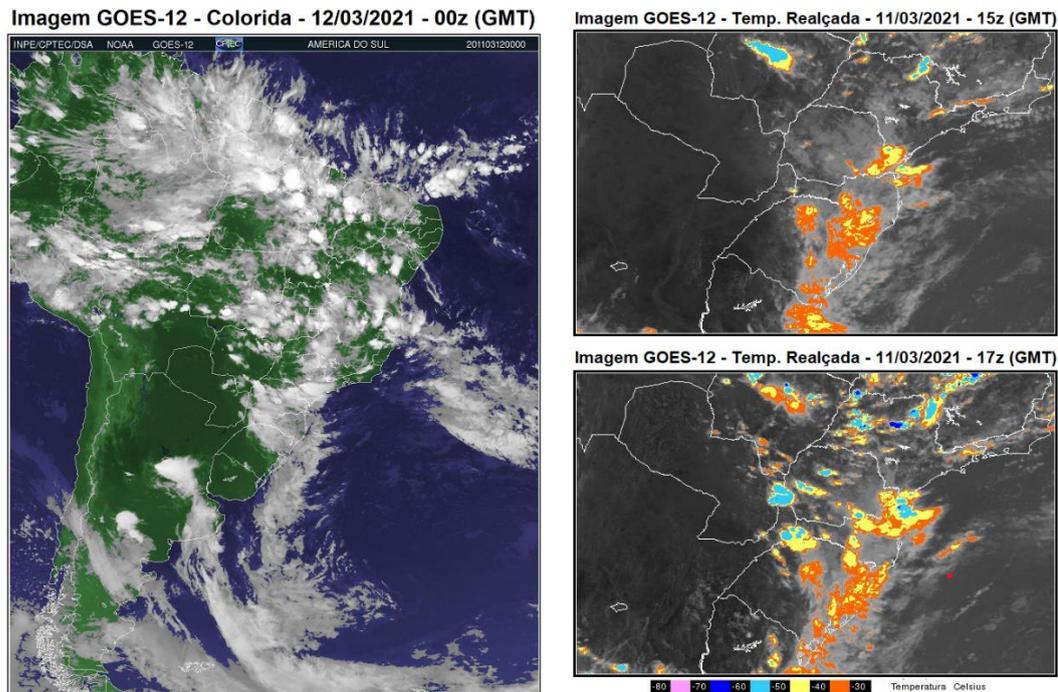
Figura 4 - Cartas sinóticas de superfície das 21 horas dos dias 8 a 13 de março de 2021 – horário local (9 a 14/03/2011 – 00z – GMT).



Fonte: CPTEC (2021).

Quanto à região deste estudo, nota-se no dia 11 o aparecimento de linhas de instabilidade entre os estados do Paraná e São Paulo. Nesse período, foi possível verificar a formação de múltiplos núcleos de nebulosidade por convecção em quase todo o país, em associação com os sistemas atuantes no Brasil central e a instabilidade provocada pelos cavados na massa de ar tropical atlântica. O fluxo de ar demonstrou uma trajetória em direção à região Sul do Brasil, com registro de ventos fortes sobre o Paraná, o que se estenderia até o dia 12. A Figura 5 destaca na imagem colorida a abrangência da nebulosidade mais densa associada aos cavados e ao fluxo de umidade. A figura destaca ainda duas imagens com temperatura realçada no canal infravermelho, mostrando que, ao meio-dia de 11 de março, havia dois sistemas de células convectivas avançando pelas laterais de Morretes-PR (oeste-leste).

Figura 5 – Imagem do Satélite GOES-12 coloridas da noite do dia 11 (12/03/2021 – 00z GMT), destacando a abrangência da nebulosidade mais densa e as duas zonas anticiclônicas a oeste e a leste do cavado; em destaque, duas imagens no canal Infravermelho realçado exibindo a entrada do sistema convectivo no litoral do Paraná.

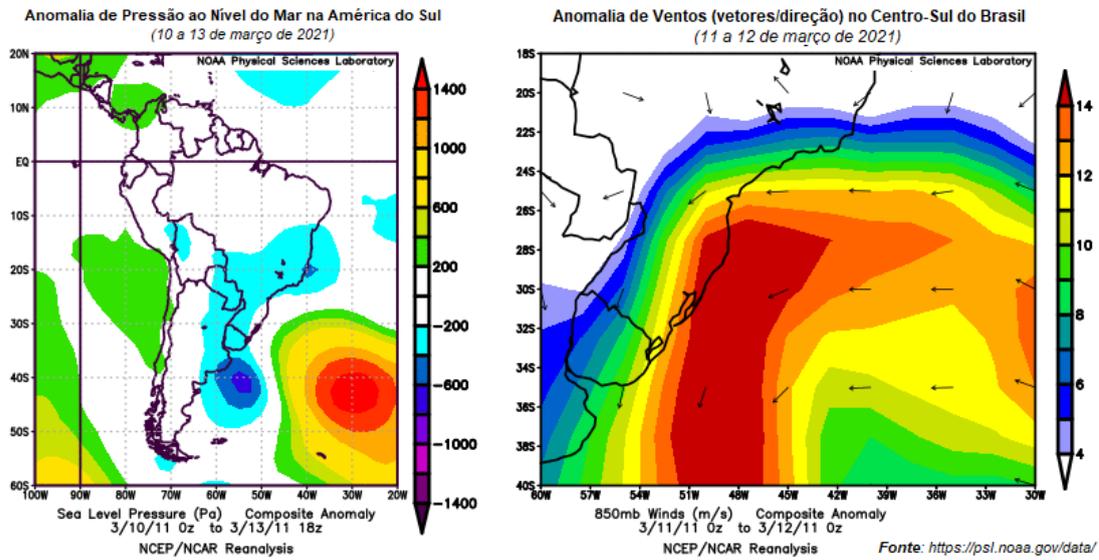


Fonte: CPTEC (2021).

Estas células convergiram posteriormente sobre o município provocando um risco potencial de tempestades, condição que perdurou por várias horas na região. Por volta das 14 horas, a temperatura de topo da nuvem superava -60°C e o núcleo situava-se justamente sobre a área de estudo (ponto vermelho em destaque no litoral do Paraná na imagem das 17z).

Em relação aos dados de reanálise climática, a porção esquerda da Figura 6 expõe um mapa de anomalia de pressão atmosférica ao nível do mar entre os dias 10 a 13 de março. A imagem indica uma expressiva anomalia positiva relacionada ao Anticiclone do Atlântico Sul (posicionada mais ao sul do que o habitual), a oeste da qual se observa uma anomalia negativa, próximo ao litoral da Argentina. Ao norte deste ponto observa-se uma região de baixa pressão relacionada às ZCAS que ocorreu nos dias anteriores e ajudou a dificultar o avanço de massas de ar. Toda essa configuração e padrão de circulação influenciou a saída de ventos ao norte do anticiclone (sentido anti-horário) em direção ao continente margeando o litoral brasileiro, indo na direção sul e atravessando o litoral paranaense, conforme destacado na imagem à direita (Figura 6).

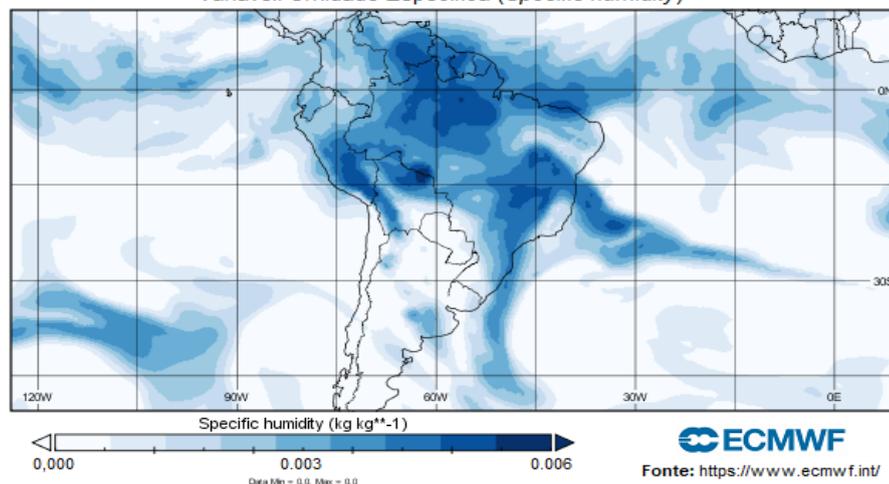
Figura 6 – Dados de anomalia de pressão atmosférica e ventos no período do evento.



Tal dinâmica sinótica contribuiu para a configuração de um corredor de umidade no dia 11 de março, conforme a Figura 7, que evidencia a variável umidade específica (*specific humidity*) na média troposfera (500 hpa). Nesse aspecto, ressalta-se que um fenômeno bastante semelhante também foi observado nos dados da variável coluna de vapor (*total column water vapor*). Diante deste cenário, ao longo de todo dia 11 a região do litoral paranaense permaneceu com densa nebulosidade e aporte de umidade, o que favoreceu a convecção e a ocorrência do evento extremo de precipitação na região da Serra do Mar.

Figura 7 – Dados de Umidade Específica para o dia 11 de março de 2021 às 21 horas.

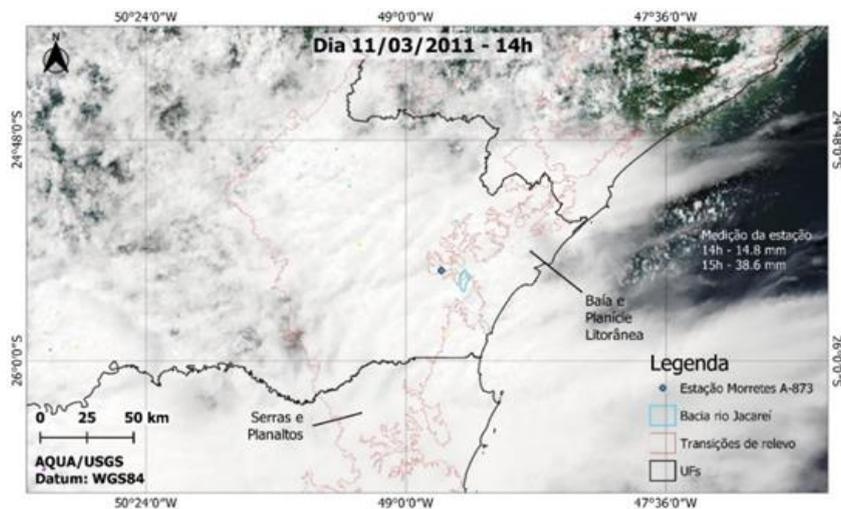
Dados de Reanálise ERA-Interim ECMWF - 11/03/2021 - 21 hrs (horário de Brasília)
Variável: Umidade Específica (*Specific humidity*)



Conforme os boletins meteorológicos da ocasião, emitidos pelo CPTEC, dentre todos os modelos analisados, o modelo ETA regional de grade 40 Kms teve maior acurácia em relação ao fenômeno à época, indicando a formação de uma zona de pressões abaixo de 1000 hPa no local, o que se confirmou posteriormente (CHOU, 1996; CPTEC, 2021).

As imagens do sensor MODIS/Aqua analisadas permitiram observar a grande extensão da área de instabilidade sobre a região da baía de Paranaguá e imediações, com área de abrangência discrepante em relação ao tamanho da bacia hidrográfica do rio Jacareí (contorno em azul claro na Figura 8).

Figura 8 – Imagem MODIS (USGS, 2020) do dia 11/03/2011 – 14 horas no horário local (17z GMT). Índícios da influência da orografia sobre os sistemas atuantes.



Nota-se também a diferença de textura em relação a outras áreas nebulosas no entorno, principalmente na transição entre o primeiro e o segundo planalto paranaenses, indicando um possível efeito da orografia sobre a área de abrangência deste sistema. Ainda, as imagens permitem identificar que o sistema atuante por volta das 14 horas transitava em sentido NE-SO, o que favoreceria a ocorrência de precipitação orográfica tanto na face leste da Serra da Prata, quanto na porção interna da bacia do rio Jacareí.

No entanto, os dados analisados não permitem caracterizar este efeito na área da Serra do Mar como determinante para a magnitude ou para a intensidade do evento. Isto se dá porque foram observados acumulados elevados em outros locais distantes como Maringá-PR, por exemplo, com precipitação superior a 100 mm ao final do dia 12 (Tabela 2) e com intensidade máxima de 63,4 mm/h no dia 11.

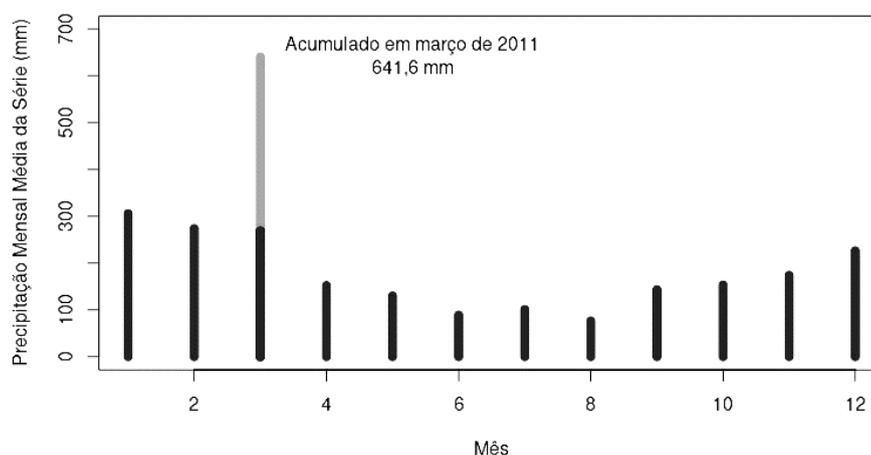


Observa-se assim que as condições atmosféricas observadas sobre a bacia hidrográfica do rio Jacareí propiciaram a formação e o desenvolvimento de sistemas convectivos e a convergência de umidade justamente sobre a região leste do Paraná, incluindo a Serra do Mar e o primeiro planalto. As condições de circulação observadas na Figura 7 indicam ainda um aporte de umidade do oceano em sentido que favorece a ocorrência de chuvas orográficas.

3.2. Magnitude e Duração da Precipitação

Os eventos de março de 2011 se destacaram em meio aos registros históricos e do monitoramento meteorológico do local. A partir da série histórica da Estação Convencional Colônia Santa Cruz, no período desde a instalação até 2018, observa-se que o valor precipitado no mês de março de 2011 (641,6 mm, em destaque) foi superior ao dobro do registrado em média para este mês nos 37 anos antecedentes (265,24 mm), como observa-se na Figura 10.

Figura 10 - Precipitação mensal média na série histórica da estação convencional Colônia Santa Cruz (06/1974 – 10/2018) em preto, com destaque em cinza claro para o valor acumulado do mês de março de 2011.



Fonte: ANA/AGUASPARANÁ (2018) – dados.

Conforme dados da estação convencional Colônia Santa Cruz, entre os dias 10 e 13 de março de 2011 a precipitação acumulada foi de 427,6 mm (AGUASPARANÁ/ANA, 2018). Já a série da Estação Automática Morretes A-873 possibilitou maior detalhamento temporal, conforme observa-se na Tabela 3 e na Figura 11.

Tabela 3 - Principais eventos pluviométricos na série da estação Morretes – A873.

N	Início	Término	Acum, (mm)	H	HC	Imed (mm/h)	Imax (mm/h)	Tmed (°C)	Tmin (°C)	Tmax (°C)	Vel, Vento	Estação
1	08/03/2011 16:00	14/03/2011 14:00	406,4	143	101	4,02	42,6	23,28	20,2	30,7	4,8	Verão
2	20/06/2013 04:00	21/06/2013 22:00	175,8	43	40	4,40	19,4	17,33	16,4	19,1	3,5	Inverno
3	13/02/2015 17:00	16/02/2015 07:00	156,0	63	45	3,47	52,8	22,03	19,9	27,9	3,4	Verão
4	04/06/2012 06:00	07/06/2012 11:00	155,6	78	52	2,99	14,8	15,62	13,4	18,5	3,4	Outono
5	30/07/2011 04:00	02/08/2011 01:00	143,8	70	56	2,57	7,4	16,33	15	21,1	2,8	Inverno
6	22/04/2010 18:00	24/04/2010 04:00	129,2	35	30	4,31	26	19,96	18,2	23	2	Outono
7	25/04/2012 21:00	26/04/2012 22:00	129,0	26	21	6,14	24	18,38	17,5	19,6	1,7	Outono
8	16/01/2017 19:00	17/01/2017 17:00	129,0	23	15	8,60	43	24,58	22,8	29,1	2,7	Verão
9	15/02/2019 11:00	17/02/2019 17:00	120,6	55	38	3,17	13,8	21,19	18,5	28,4	3	Verão
10	03/03/2010 21:00	06/03/2010 22:00	119,0	74	48	2,48	9,2	22,27	18,8	28,2	3,9	Verão
11	30/05/2019 03:00	31/05/2019 17:00	119,0	39	31	3,84	23,8	19,65	18,6	22,3	2,2	Outono
12	20/07/2013 08:00	23/07/2013 10:00	117,6	75	56	2,10	12,2	14,08	7,1	19,9	3,9	Inverno
13	18/05/2017 04:00	20/05/2017 19:00	116,8	64	57	2,05	9	19,29	17,8	21,4	4	Outono
14	01/01/2014 18:00	02/01/2014 01:00	110,8	8	8	13,85	47,8	23,74	23,3	30,3	3,2	Verão
15	13/12/2010 06:00	14/12/2010 23:00	106,4	42	36	2,96	16,6	17,11	13,9	22,3	6,2	Primavera
16	11/11/2008 05:00	12/11/2008 14:00	103,0	34	25	4,12	30,2	20,15	18,1	23,5	2,5	Primavera
17	23/02/2012 13:00	25/02/2012 09:00	102,8	45	33	3,12	17,2	23,95	21,4	31,8	1,8	Verão
18	18/01/2011 18:00	20/01/2011 01:00	99,6	32	19	5,24	38,8	23,41	21,7	27,3	2,3	Verão
19	23/12/2017 15:00	25/12/2017 13:00	98,6	47	27	3,65	16	24,28	20,5	30,7	4,4	Verão
20	20/01/2010 16:00	23/01/2010 23:00	97,2	80	42	2,31	33,6	23,03	20,9	32,2	3,7	Verão

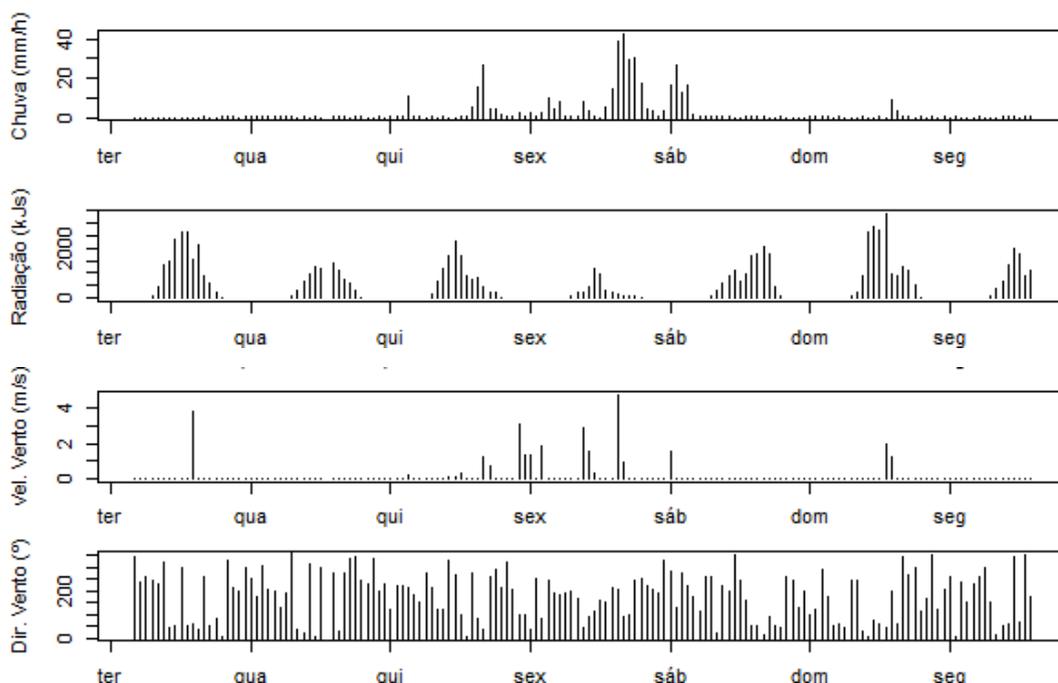
Em que: N é a referência do registro; Início é a primeira hora com precipitação acima de 0,2 mm após um intervalo de 6 horas; Término é a última hora com precipitação acima de 0,2 mm antes do próximo intervalo de 6 horas sem chuva; H é a duração total do evento; HC é a soma dos períodos do evento em que efetivamente choveu; Imed é a intensidade média do evento (mm/h); Imax é a máxima intensidade horária registrada durante o evento; Tmed, Tmin e Tmax são respectivamente as temperaturas médias, mínima e máxima registradas durante o evento; Vel. Vento Max. é a máxima velocidade do vento registrada durante o evento.



Para cada evento de chuva extraíram-se valores de intervalo (horas), de horas de chuva efetiva, de acumulado (mm), de intensidade média sobre horas de chuva efetiva, de intensidade máxima do período e de estação do ano.

Foram identificados na série 1214 eventos de chuva, desconsiderando-se eventos com duração de apenas uma hora ou acumulado menor que 0,2 mm. Exibem-se os 20 eventos de maior valor para esta variável. Estão dispostos na tabela também as temperaturas média, mínima e máxima, a velocidade máxima do vento e a estação do ano. Observa-se na Tabela 3 que dois eventos ocorridos no verão de 2011 se destacam entre os mais severos desta série. O primeiro evento, indicado pelo código 1, está diretamente associado aos movimentos gravitacionais de massa ocorridos na bacia do rio Jacareí. Os gráficos da Figura 11 representam excertos da série para o período entre os dias 8 (terça-feira) e 15 de março (terça-feira), para as variáveis que apresentaram alteração de comportamento na tarde do dia 11 (sexta-feira).

Figura 11 - Séries de dados da Estação Meteorológica Morretes-A873. Dias 8 (terça) e 14/03/2011 (segunda). O dia 11 de março de 2011 corresponde à sexta-feira.



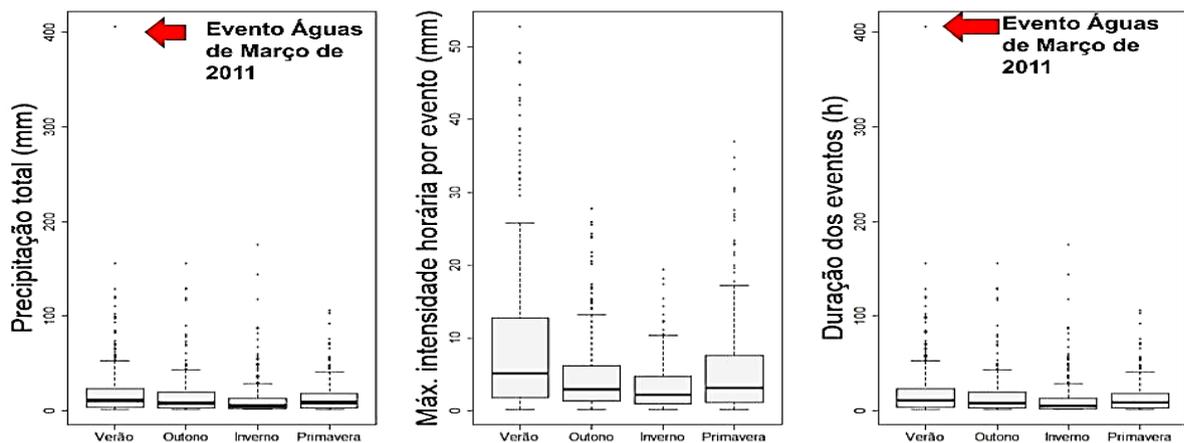
Fonte: INMET (2019) - dados.

Gerados a partir destes dados, os *boxplots* da Figura 12 evidenciam a distribuição destes eventos na série, conforme as estações do ano para as variáveis “acumulado” (mm), “duração” (h) e “intensidade máxima” (mm/h).

Os *boxplots* corroboram a tendência observada na região de que chuvas mais intensas ocorrem no verão, período de grandes volumes de chuva registrados em curtos períodos. Observa-se também que os eventos de maior duração são mais recorrentes no outono e no inverno.

Conforme identificado, o evento Águas de Março ocorreu entre as 6 horas do dia 08/03/2011 e as 14 horas do dia 14/03/2011. A análise deste conjunto de eventos indica que este foi o episódio de maior acumulado da série com 406,40 mm registrados em um intervalo de 143 horas, com 101 horas de chuva efetiva (com registros superiores a 0,2 mm).

Figura 12 - *Boxplots* das características dos eventos pluviométricos avaliadas por estações do ano, no conjunto de dados de eventos gerado a partir dos dados da Estação Morretes-A873. O evento Águas de Março está destacado em vermelho.



Em relação às frequências e características dos eventos, a Tabela 4 sintetiza as principais informações. Na sequência a Figura 13 dispõe das curvas de permanência que permitem a visualização das características do evento frente ao observado na série usualmente.

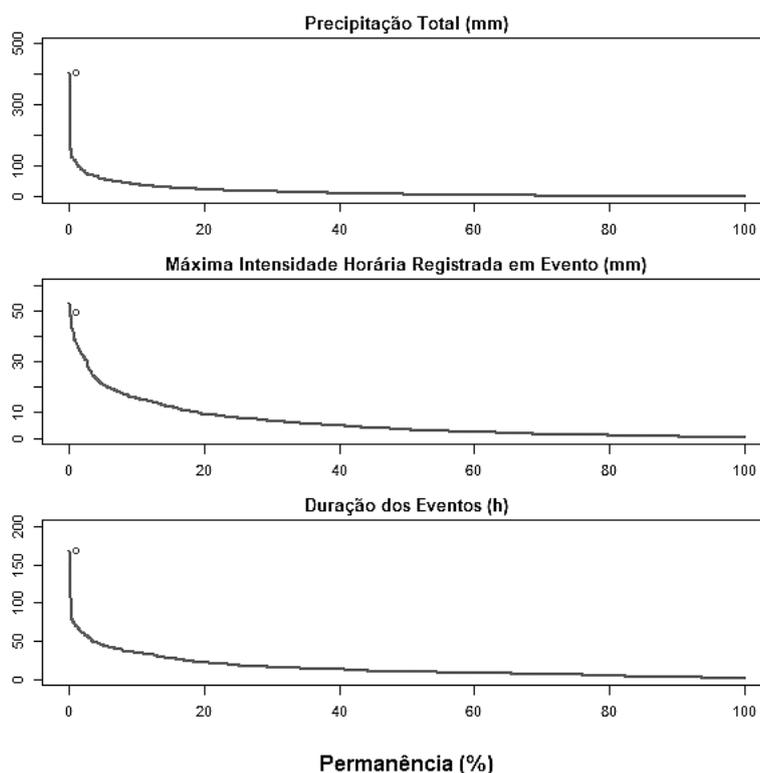


Tabela 4 - Frequências de características de eventos e comparação com o evento Águas de Março.

	Acumulado (mm)	Intensidade máx. (mm/h)	Temperatura do Ar (°C)	Velocidade do Vento (km/h)	Duração (h)
Média	16,59	0,22	20,61	8,21	15,22
Valor Máximo	406,6	53,80	31,4	48,96	143
Valor no Águas de Março	406,6	42,6	23,3	17,28	143
Percentil 99%	4	8,60	27,39	25,56	60
Mais Frequente (valor e frequência)	1,2 = 43	0.6 = 73	23 = 6	0 = 109	2 e 5 = 77

A Tabela 4 evidencia a excepcionalidade do evento pluviométrico associado ao Águas de Março que superou o observado em 99% dos outros eventos da série para as variáveis chuva acumulada, intensidade máxima e duração. Entretanto, com relação às intensidades máximas registradas foi identificado que o evento mais intenso ocorreu no ano de 2015, com 52,8 mm registrados em uma hora. O evento de 2011 é, portanto, o segundo evento mais severo neste quesito, com um máximo de intensidade registrada de 42,6 mm de chuva em uma hora, qualificando-se como “forte” conforme os parâmetros da Tabela 1.

Figura 13 - Permanência dos valores de acumulado pluviométrico, máxima intensidade horária e duração de eventos agrupados ao longo da série. O círculo corresponde ao evento severo do dia 11/03/2011.



A Figura 13 corrobora este aspecto por evidenciar que a precipitação total acumulada do evento e a duração observadas durante o Águas de Março são mais atípicas em relação à série do que a intensidade observada. Conforme CARDOSO et al. (2020) as chuvas intensas têm maior probabilidade de ocorrência no estado do Paraná do que as chuvas persistentes, o que também corrobora a ideia de excepcionalidade do evento das Águas de Março.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Mesmo diante do contexto de suscetibilidade intrínseca a movimentos gravitacionais de massa na bacia do rio Jacaré, os fluxos de detritos não são registrados com frequência na região, conforme observado em registros da Defesa Civil. Um evento da magnitude e do alcance do que ocorreu em 2011 nunca havia sido registrado e tampouco observado pela população. Esta excepcionalidade foi comprovada quantitativamente neste estudo a partir da descrição das condições meteorológicas da bacia do rio Jacaré naquele contexto, em resolução horária e frente aos dados históricos.

A análise das cartas sinóticas e de imagens oriundas de sensoriamento remoto evidencia que a região litorânea do Estado do Paraná é propícia para a convergência de aportes de umidade associados a diversos fatores de circulação atmosférica. No mês de março de 2011 sistemas distintos convergiram, todos com grande potencial de aporte de umidade, culminando na persistência da precipitação por várias horas na região da Serra do Mar paranaense. Dentre as origens da precipitação na ocasião do evento destacam-se: a atuação de um cavado sobre a região sul; e a geração de nebulosidade na região a leste dos Andes e o trânsito dessa massa úmida de oeste para sul/leste, onde costuma resultar em instabilidade atmosférica em altos níveis com chuvas intensas e prolongadas. Simultaneamente, ocorreram aportes de leste de umidade oriunda da região do oceano atlântico para a região continental, em diversos níveis com a formação de um corredor de umidade e baixas pressões como observado por meio dos dados de reanálise. Houve ainda, de forma secundária, aporte de umidade deslocada de sistemas atmosféricos próximos à região de atuação da ZCAS. Foram identificados também indícios do efeito da orografia sobre os sistemas atuantes, possivelmente contribuindo para a permanência dos mesmos sobre o local. As zonas de ocorrência de bloqueios atmosféricos a leste e oeste também contribuíram para este cenário.



A influência do relevo da Serra do Mar sobre a incidência de chuvas intensas na região demanda estudos mais específicos.

O tratamento dos dados da estação meteorológica Morretes permitiu a singularização de todos os eventos pluviométricos registrados pela estação, com destaque para os que tiveram interferência nos eventos extremos identificados no período de maior interesse (de 8 a 14 de março de 2011). A separação em eventos viabilizou a medida da excepcionalidade do evento ocorrido diante dos dados, que mostraram que os eventos de 2011 foram até duas vezes mais severos do que os eventos mais duradouros e de maior acumulado pluviométrico observados no restante da série. Isto implicou em respostas hidrogeomorfológicas igualmente extremas diante do cenário de suscetibilidade a movimentos gravitacionais de massa existente. Nos três quesitos - intensidade, duração e acumulado - a precipitação ocorrida no evento Águas de Março foi superior às observações dos percentis 99%. Entretanto, os máximos de intensidade horária registrados durante o evento são menos raros do que a duração total e o acumulado observados, indicando que o caráter de excepcionalidade do evento Águas de Março reside mais sobre a sua extensa duração do que sobre as intensidades horárias registradas.

A resolução horária dos dados analisados também permitiu identificar possíveis situações de saturação do solo na bacia poucos dias antes do evento principal (dia 11), na transição entre os dias 6 e 8 de março. Este cenário de saturação de solo seguido de novo aporte pluviométrico em grande intensidade e curto período é bastante favorável à liquefação dos solos e provavelmente está associado à ocorrência de movimentos gravitacionais de massa. Estas observações endossam a ideia da importância da umidade antecedente para a ocorrência de movimentos gravitacionais de massa deflagrados pela chuva, especialmente na região da bacia hidrográfica do rio Jacaréí. Pesquisas complementares acerca das características pedológicas e geomorfológicas do local são necessárias para aprofundar a análise da umidade antecedente e da contribuição da intensidade da chuva e de sua variação horária à luz de aspectos como a coesão, a condutividade hidráulica e a tensão de cisalhamento impostas nesse contexto.

Portanto, por meio deste trabalho conclui-se que principalmente nas áreas mais suscetíveis à ocorrência de movimentos gravitacionais de massa da Serra do Mar, dois aspectos são imprescindíveis no monitoramento de eventos extremos. O primeiro deles é a

simultaneidade de atuação de sistemas atmosféricos distintos como os descritos sobre uma mesma região. E o segundo é a persistência extraordinária da atuação destes sistemas sobre um mesmo local de forma prolongada. Estes aspectos devem ser considerados também à luz das tendências locais relacionadas às mudanças climáticas que se apresentarão nos próximos anos.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi desenvolvido no contexto do projeto “Influência da floresta na dinâmica hidrossedimentológica de bacias montanhosas no Sul do Brasil”, promovido pela CAPES - Coordenação de Aperfeiçoamento Pessoal de Nível Superior e pela ANA - Agência Nacional de Águas e Saneamento. Os autores agradecem também a: Prof. Dr. Felipe Costa Abreu Lopes, Edson Nagashima, Edir Edemir Arioli, Prof. Dr. Masato Kobiyama, Prof. Dr. Gean Paulo Michel, Prof. Dr. Wagner Bonat, Eng. Eduardo Ballesteros Sánchez e Gabriela Branco de Souza. Agradecemos ainda aos profissionais do CEGERD – Coordenadoria Estadual de Defesa Civil, Cap. Anderson Gomes e Cap. Marcos Vidal.

REFERÊNCIAS

AEN - Agência Estadual de Notícias do Paraná. Equipes avaliam retirada de madeira do leito do rio Jacareí, em Morretes. 2011. Disponível em <https://www.aen.pr.gov.br/modules/noticias/article.php?storyid=64742&tit=Equipes-avaliam-retirada-de-madeira-do-leito-do-rio-Jacarei-em-Morretes>. Acesso em Março de 2020.

AGUASPARANÁ - Instituto das Águas do Paraná. Série diária da Estação Colônia Santa Cruz. Sistemas de Informações Hidrológicas. 2019.

ALERTA RIO - Sistema Alerta Rio da Prefeitura do Rio de Janeiro. **Termos Meteorológicos**. 2021. Disponível em: <http://www.sistema-alerta-rio.com.br/previsao-do-tempo/termosmet/>. Acesso em: Outubro de 2020.

AMBRIZZI, T.; REBOITA, M.S.; ROCHA, R.P.; LLOPART, M. The stage of the art and fundamental aspects of regional climate modeling in South America. **Annals of the New York Academy of Sciences**. Vol. 1436. 2018.

ÁVILA, A.; JUSTINO, F.; WILSON, A.; BROMWICH, D.; AMORIM, M. Recent precipitation trends, flash floods and landslides in southern Brazil. **Environmental Research Letters**. N. 11. 2016.

BERNARDINO, B.S.; VASCONCELLOS, F.C.; NUNES, A.M.B. Impact of the equatorial Pacific and



South Atlantic SST anomalies on extremes in austral summer precipitation over Grande river basin in Southeast Brazil. **International Journal of Climatology**. V. 38. 2018.

BRASIL. Ministério da Integração. Classificação e Codificação Brasileira de Desastres. 2012.

BUENO, K.E.M. Aplicação do índice RDE para identificar regiões de deposição de fluxos de detritos na bacia do rio Jacareí – Serra do Mar Paranaense. In: **XXI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**, ABRH, Brasília-DF, 2015.

CARDOSO, C.S.; QUADRO, M.F.K.; BONETTI, C. Persistência e Abrangência dos Eventos Extremos de Precipitação no Sul do Brasil: Variabilidade Espacial e Padrões Atmosféricos. **Revista Brasileira de Meteorologia**. V. 35 N. 2. 2020.

CHOU, S.C. Modelo regional ETA. **Climanálise - Boletim de Monitoramento e Análise Climática**. 1996.

CPTEC. Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos. Boletim Meteorológico do dia 11 de março de 2011. Disponível em: <http://www.cptec.inpe.br/>. Acesso em: Setembro de 2020.

CPTEC. Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos. Cartas Sinóticas de Altitude e de Superfície do período entre 8 de março de 2011 às 21 horas e o dia 14 de março de 2011 15 horas. 2020. Disponível em: <http://www.cptec.inpe.br/>. Acesso em: Agosto de 2021.

CRED – Centre for Research on the Epidemiology of Disasters. EM-DAT: The Emergency Events Database - Université catholique de Louvain (UCL) - Disponível em: www.emdat.be, Brussels, Belgium. Acesso em Março de 2020.

DC - PR - Defesa Civil do Paraná. Relatórios de ocorrências de movimentos gravitacionais de massa. 2019.

DE MELLO, Y. R.; LOPES, F. C. A.; ROSEGHINI, W. F. F. Características climáticas e análise rítmica aplicada a episódios extremos de precipitação e temperatura no município de Paranaguá, PR. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 20, 2017.

EPA - Environment Protection Agency of the United States of America. **Climate Change Indicators: Heavy Precipitation**. 2020. Disponível em: <https://www.epa.gov/climate-indicators/climate-change-indicators-heavy-precipitation>. Acesso em Julho de 2020.

FOLADOR, R.M.; SILVEIRA, C.T.; FIORI, A.P. Cálculo da Probabilidade e Quantificação do Volume de Material Suscetível a Escorregamentos – Bacia do Rio Jacareí, Morretes – PR. **Boletim Paranaense de Geociências**, 74-1, p.47-56, 2018.

GARREAUD, R. D.; ACEITUNO, P. Atmospheric circulation over South America: mean features and variability. **The physical geography of South America**. Oxford University Press, Oxford, England, 2007.

GOSWAMI, B. Multiscale interaction with topography and extreme rainfall events in the northeast Indian region. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 115, n. D12, 2010.

GUIJARRO, J. A. Package 'climatol'. 2019.

GRIMM, A. M. Madden–Julian Oscillation impacts on South American summer monsoon season: precipitation anomalies, extreme events, teleconnections, and role in the MJO cycle. **Climate Dynamics**, v. 53, n. 1, p. 907-932, 2019.

HADER, P. The escalation of extreme rainfall events in Brazil. In: **Natural Hazards**. EGU Blogs, 2020. Disponível em: <https://blogs.egu.eu/divisions/nh/2021/02/22/2020-the-escalation-of-extreme-rainfall-events-in-brazil/>. Acesso em Junho/2021.

HUFF, F. A. Time distribution of rainfall in heavy storms. **Water resources research**, v. 3, n. 4, p. 1007-1019, 1967.

HUNGR, O.; EVANS, S.G.; BOVIS, M.; HUTCHINSON, J.N. A review of the classification of landslides of the flow type. **Environmental & Engineering Geoscience**, v. VII, n. 3, P. 221-238, 2001.

IAPAR - Instituto Agrônômico do Paraná. Normais climatológicas para o estado do Paraná. **Atlas Climatológico do Estado do Paraná**. Acesso em Outubro de 2019.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Estimativas de População 2020**. Disponível em: https://ftp.ibge.gov.br/Estimativas_de_Populacao/Estimativas_2020/POP2020_20210331.pdf. Acesso em Maio de 2021.

INMET - Instituto Nacional de Meteorologia. Série Histórica Horária da Estação Morretes A-873. 2019.

INPE - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. Imagens do satélite geoestacionário EUMETSAT do período de 07 a 12 de março de 2011. Acervo de imagens anteriores. Disponíveis em: <http://satelite.cptec.inpe.br/acervo/goes.formulario.logic>. Acesso em Janeiro de 2011.

INPE - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. Imagens do satélite geoestacionário GOES 12 do período de 07 a 12 de março de 2011. Acervo de imagens anteriores. Disponíveis em: <http://satelite.cptec.inpe.br/acervo/goes.formulario.logic>. Acesso em Janeiro de 2011.

IPMA - Instituto Português do Mar e da Atmosfera. Classificação de intensidade da precipitação líquida. 2021. Disponível em: https://www.ipma.pt/pt/educativa/faq/meteorologia/previsao/faqdetail.html?f=/pt/educativa/faq/meteorologia/previsao/faq_0033.html. Acesso em: Outubro de 2020.

JUNQUAS, C.; LI, L.; VERA, C. S.; LE TREUT, H.; TAKAHASHI, K. Influence of South America orography on summertime precipitation in Southeastern South America. **Climate Dynamics**, v. 46, n. 11, p. 3941-3963, 2016.

KANG, Y.; PENG, X.; WANG, S.; DONG, C.; SHANG, K.; ZHAO, Y. Statistical characteristics and synoptic situations of long-duration heavy rainfall events over North China. **Earth and Space Science**, v. 7, n. 5, p. e2019EA000923, 2020.

LIN, Y.; CHIAO, S.; WANG, T.A.; KAPLAN, M.L.; WEGLARZ, R.P. Some common ingredients for heavy orographic rainfall. **Weather and forecasting**, v. 16, n. 6, p. 633-660, 2001.



LOPES, A.B.; TANAKA, H.S.; PICANÇO, J. Caracterização de perfil de solo na sub-bacia do rio Santa Cruz – Paranaguá (PR), para análise suscetibilidade para fluxos de detritos na área. In: XXIII Congresso de Iniciação Científica da Unicamp, Campinas-SP, 2015.

MAACK, R. **Geografia física do Estado do Paraná**. 1968. Editora UEPG. Ponta Grossa - PR, 2002.

MARTINS, A.; FERREIRA, M.B.P.; PONTONI, D.R.; BATISTA, A.H.; PASSOS, E. Descrição da compartimentação de processos de movimento de massa na Serra da Prata em Morretes – PR. In: IX Simpósio Nacional de Geomorfologia, Rio de Janeiro-RJ, 2012.

MELO, L.L.; MESQUITA, M.; PICANÇO, J. O estudo do regolito na sub-bacia do Córrego do Gigante (Morretes, PR): subsídios para a análise de nucleação de debris flows. In: 15º Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia e Ambiental, Bento Gonçalves-RS, 2015.

MESINGER, F. A blocking technique for representation of mountains in atmospheric models. **Riv. Meteor. Aeronautica**, 44, 195-202, 1984.

MINEROPAR – Minerais do Paraná. **Atlas geomorfológico do Estado do Paraná**. Escala base, v. 1, n. 250.000, 2006.

MONTINI, T.; JONES, C.; CARVALHO, L. M. The South American Low-Level Jet: A New Climatology, Variability, and Changes. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**. AGU. 124, 1200-1218. 2019.

NASA Goddard Space Flight Center, Ocean Ecology Laboratory, Ocean Biology Processing Group. Moderate-resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) Aqua {Dataset Name} Data; NASA OB.DAAC, Greenbelt, MD, USA.

NASCIMENTO, L.; RODRIGUES SILVESTRE, M.; SANT'ANNA NETO, J. L. Trends and rainfall tropicalization in Paraná State, south of Brazil. **Atmosfera**, v. 33, n. 1, 2020.

PINTO, R.C.; PASSOS, E.; CANEPARO, S.C. Classificação dos movimentos de massa ocorridos em março de 2011 na Serra da Prata, estado do Paraná. **Geoingá: Revista do Programa de Pós-Graduação em Geografia**, Maringá, v.4, n.1, p. 3-27, 2012.

PINTO, R.C.; PASSOS, E.; CANEPARO, S.C. Mapeamento de suscetibilidade aos movimentos de massa com uso da Avaliação Multicritério pelo método da Média Ponderada Ordenada. **Caderno de Geografia**, v.25, n.43, 2015.

PINTO, R.C.; PASSOS, E.; CANEPARO, S.C. Movimentos de massa como processos naturais de evolução das encostas, estudo de caso: bacia do rio Jacareí, municípios de Morretes e Paranaguá-PR. **Geoingá: Revista do Programa de Pós-Graduação em Geografia**, Maringá, v.6, n.1, p. 23*45, 2014.

PROTECCION CIVIL DE ESPAÑA. Lluvias Fuertes. 2020. Disponível em: <https://www.proteccioncivil.es/coordinacion/gestion-de-riesgos/meteorologicos/lluvias-intensas>. Acesso em Outubro de 2020.

QUADROS, L. E.; MELLO, E. L.; GOMES, B. M.; ARAÚJO, F. C. Rainfall trends for the State of Paraná: present and future climate. **Ambiente e Água**. Vol. 14. N. 2. 2019.

REBOITA, M. S.; GAN, M. A.; ROCHA, R. P. D.; AMBRIZZI, T. Precipitation regimes in South America: a bibliography review. **Revista Brasileira de Meteorologia**, 25(2), 185-204. 2010.

REGOTO, P.; DEREZYNSKI, C.; CHOU, S. C.; BAZZANELLA, A.C. Observed changes in air temperature and precipitation extremes over Brazil. **International Journal of Climatology**, 2021.

REID, M. E.; LAHUSEN, R. G.; IVERSON, R. Debris-flow initiation experiments using diverse hydrologic triggers. **Debris-Flow Hazards Mitigation: Mechanics, Prediction and Assessment**, p. 1-11, 1997.

RODRIGUES, R.R.; WOOLLINGS, T. Impact of atmospheric blocking on South America in Austral Summer. **Journal of Climate**. V. 30. 2016.

SATO, L.L.; PICANÇO, J. Inventário dos escorregamentos na Serra da Prata (PR) no evento hidrológico de 12/03/2011. In: XXV Congresso de Iniciação Científica da Unicamp, Campinas-SP, 2017.

SILVA, J. P.; SILVEIRA, C.T.; FIORI, A.P. Aplicação de dois métodos físico-matemáticos para avaliação do índice de estabilidade das vertentes da bacia do rio Ribeirão/Paranaguá-PR. **Revista Geonorte**, Edição Especial, V.2, N.4, p.1291-1302, 2012.

SILVEIRA, C. T. et al. Análise do Fator de Segurança da estabilidade das vertentes na bacia do rio Jacareí, Serra do Mar Paranaense. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 13, n. 3, p. 287-297, 2012.

SILVEIRA, C.T.; FIORI, A.P.; FERREIRA, A.M.; DE GÓIS, J.R.; DE MIO, G.; SILVEIRA, R.M.P.; BASSI, N.E.M.; LEONARDI, T.M.H. Emprego de atributos topográficos no mapeamento da susceptibilidade a processos geoambientais na bacia do rio Jacareí, Paraná. **Sociedade & Natureza**, vol. 25, núm. 3, Uberlândia, 2013, pp. 623-639

SILVEIRA, C.T.; FIORI, A.P.; FERREIRA, A.M.; FELIPE, R.S.; KEPEL FILHO, J.L.; FOLADOR, R.M.; COSTA, L.C. Análise do fator de segurança da estabilidade das vertentes na bacia do rio Jacareí, Serra do Mar paranaense. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, UGB, v.13, n. 3, p.287-297, 2012.

SILVEIRA, C.T.; FIORI, A.P.; FERREIRA, A.M.; ZAI, C.; SILVEIRA, R.M.P.; MASSULINI, N.E.B.; LEONARDI, T.; KEPEL FILHO, J.L. Mapeamento de suscetibilidade a processos geoambientais na bacia do rio Jacareí, estado do Paraná. In: IX Simpósio Nacional de Geomorfologia, Rio de Janeiro-RJ, 2012.

SILVEIRA, C.T.; FIORI, A.P.; SCHILIPACK, P.; DIAS, S.M. Mapeamento preliminar da suscetibilidade natural a movimentos de massa da Serra do Mar paranaense apoiado na análise digital do relevo. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, UGB, v.15, n.1, 2014.

SIMEPAR - Sistema de Tecnologia e Monitoramento Ambiental do Paraná, ITCG - Instituto de Terras, Cartografia e Geologia do Paraná. **Mapa de Clima do Paraná**. Disponível em: http://www.iat.pr.gov.br/sites/agua-terra/arquivos_restritos/files/documento/2020-07/mapa_climas_a3.pdf. Acesso em Março de 2021.



SMITH, Ronald B. Progress on the theory of orographic precipitation. **Special Papers-Geological Society Of America**, v. 398, p. 1, 2006.

SMITH, R. B.; EVANS, J. P. Orographic precipitation and water vapor fractionation over the southern Andes. **Journal of Hydrometeorology**, v. 8, n. 1, p. 3-19, 2007.

STURION, F.O. Caracterização dos fluxos gravitacionais de massa no bairro floresta (Morretes, PR) durante a megacatastrofe de março/2011. 83 pgs. Trabalho de Conclusão de Curso – Instituto de Geociências, Unicamp, Campinas-SP, 2013.

TANAKA, H.S.; COSTA, V.V.; PIKANÇO, J.; LUIZ, E.F.O.; LOPES, A.B.B. Caracterização da suscetibilidade para os fluxos de detritos (debris flows) e fluxos de enchente (debris floods) na sub-bacia do Rio Santa Cruz, Paranaguá- PR, no evento meteorológico de Março de 2011. In: **15º Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia e Ambiental**, Bento Gonçalves-RS, 2015.

TAVARES, C.M.G.; FERREIRA, C.C.M. A relação entre a orografia e os eventos extremos de precipitação para o município de Petrópolis. **Revista Brasileira de Climatologia**. Vol. 16. 2020.

TAVARES, R.; MENDONÇA, F. Ritmo climático e ritmo social: pluviosidade e deslizamentos de terra na Serra do Mar – Ubatuba/SP. **Riscos climáticos: Vulnerabilidades e resiliência associados**, 2017.

TEIXEIRA, M. S.; SATYAMURTY, P. Eventos extremos de precipitação na região da Serra do Mar PARTE II: condições meteorológicas de grande escala. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA. 2006.

TERASSI, P.M.B.; GALVANI, E. O efeito orográfico da Serra do Mar e o potencial erosivo das chuvas nas bacias hidrográficas do Ribeira e Litorânea-Paraná. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 21, 2017.

USGCRP - United States Global Change Research Program. **Heavy Precipitation**. 2021. Disponível em: <https://www.globalchange.gov/browse/indicators/heavy-precipitation>. Acesso em Julho de 2020.

USGS - United States Geological Service. **Imagem Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS)** dos dias 11 e 12 de março 2011 às 14 horas. Disponíveis em: <https://earthexplorer.usgs.gov/>. Acesso em Julho de 2019.

VAN NIEKERK, A.; SANDU, I.; VOSPER, S. B. The circulation response to resolved versus parametrized orographic drag over complex mountain terrains. **Journal of Advances in Modeling Earth Systems**, v. 10, n. 10, p. 2527-2547, 2018.

VANHONI, F.; MENDONÇA, F. O clima do litoral do estado do Paraná. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 3, 2008.

VANHONI, Felipe; MENDONÇA, Francisco. O clima do litoral do estado do Paraná. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 3, 2008.

VIEIRA, B.C.; SOUZA, L.M.; ALCALDE, A.L.; DIAS, V.C.; BATEIRA, C.; MARTINS, T.D. Debris flow in Southeastern Brazil. In: 7th Conference on Debris-flow Hazards Management. 2019.

WMO - World Meteorological Organization. **Instruments and Observing Methods**. Report nº 84. 2004.

ZAI, C. GRASSO, L.; SILVEIRA, C.T.; GUARNIERI, D.O. Impactos socioambientais por movimentos de massa na comunidade de floresta, região da Serra do Mar paranaense. **Caminhos de geografia**. V. 18. N. 61. 2017. p. 19-32.