



MINISTÉRIO DA
CIÊNCIA, TECNOLOGIA
E INOVAÇÕES



sid.inpe.br/mtc-m21c/2021/03.04.13.37-TDI

**TENDÊNCIAS OBSERVADAS DE EVENTOS DE
PRECIPITAÇÃO INTENSA NA REGIÃO
METROPOLITANA DO RIO DE JANEIRO E ÁREAS
ADJACENTES**

Pedro Henrique Melo de Souza

Dissertação de Mestrado do
Curso de Pós-Graduação em
Meteorologia, orientada pelo Dr.
Jose Antonio Marengo Orsini,
aprovada em 25 de janeiro de
2021.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34R/449LQQH>>

INPE
São José dos Campos
2021

PUBLICADO POR:

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE
Coordenação de Ensino, Pesquisa e Extensão (COEPE)
Divisão de Biblioteca (DIBIB)
CEP 12.227-010
São José dos Campos - SP - Brasil
Tel.:(012) 3208-6923/7348
E-mail: pubtc@inpe.br

CONSELHO DE EDITORAÇÃO E PRESERVAÇÃO DA PRODUÇÃO INTELLECTUAL DO INPE - CEPPII (PORTARIA Nº 176/2018/SEI-INPE):

Presidente:

Dra. Marley Cavalcante de Lima Moscati - Coordenação-Geral de Ciências da Terra (CGCT)

Membros:

Dra. Ieda Del Arco Sanches - Conselho de Pós-Graduação (CPG)
Dr. Evandro Marconi Rocco - Coordenação-Geral de Engenharia, Tecnologia e Ciência Espaciais (CGCE)
Dr. Rafael Duarte Coelho dos Santos - Coordenação-Geral de Infraestrutura e Pesquisas Aplicadas (CGIP)
Simone Angélica Del Ducca Barbedo - Divisão de Biblioteca (DIBIB)

BIBLIOTECA DIGITAL:

Dr. Gerald Jean Francis Banon
Clayton Martins Pereira - Divisão de Biblioteca (DIBIB)

REVISÃO E NORMALIZAÇÃO DOCUMENTÁRIA:

Simone Angélica Del Ducca Barbedo - Divisão de Biblioteca (DIBIB)
André Luis Dias Fernandes - Divisão de Biblioteca (DIBIB)

EDITORAÇÃO ELETRÔNICA:

Ivone Martins - Divisão de Biblioteca (DIBIB)
André Luis Dias Fernandes - Divisão de Biblioteca (DIBIB)



MINISTÉRIO DA
CIÊNCIA, TECNOLOGIA
E INOVAÇÕES



sid.inpe.br/mtc-m21c/2021/03.04.13.37-TDI

**TENDÊNCIAS OBSERVADAS DE EVENTOS DE
PRECIPITAÇÃO INTENSA NA REGIÃO
METROPOLITANA DO RIO DE JANEIRO E ÁREAS
ADJACENTES**

Pedro Henrique Melo de Souza

Dissertação de Mestrado do
Curso de Pós-Graduação em
Meteorologia, orientada pelo Dr.
Jose Antonio Marengo Orsini,
aprovada em 25 de janeiro de
2021.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34R/449LQQH>>

INPE
São José dos Campos
2021

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Souza, Pedro Henrique Melo de.
So89t Tendências observadas de eventos de precipitação intensa na região metropolitana do Rio de Janeiro e áreas adjacentes / Pedro Henrique Melo de Souza. – São José dos Campos : INPE, 2021.
xxiv + 94 p. ; (sid.inpe.br/mtc-m21c/2021/03.04.13.37-TDI)

Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2021.
Orientador : Dr. Jose Antonio Marengo Orsini.

1. Tendência. 2. Precipitação Intensa. 3. Rio de Janeiro.
4. Mann-Kendall. 5. Desastres Naturais. I.Título.

CDU 551.577(815.3)



Esta obra foi licenciada sob uma Licença [Creative Commons Atribuição-NãoComercial 3.0 Não Adaptada](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/).

This work is licensed under a [Creative Commons Attribution-NonCommercial 3.0 Unported License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/).



MINISTÉRIO DA
CIÊNCIA, TECNOLOGIA
E INOVAÇÕES



INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

Serviço de Pós-Graduação - SEPGR
Pós Graduação em Meteorologia

ATA DE REUNIÃO

DEFESA FINAL DE DISSERTAÇÃO : PEDRO HENRIQUE MELO DE SOUZA

No dia 25 de janeiro de 2021, as 10h, por videoconferência, o aluno mencionado acima defendeu seu trabalho final, intitulado "TENDÊNCIAS OBSERVADAS DE EVENTOS DE PRECIPITAÇÃO INTENSA NA REGIÃO METROPOLITANA DO RIO DE JANEIRO E ÁREAS ADJACENTES." a apresentação oral foi seguida de arguição perante uma Banca Examinadora, cujos membros estão listados abaixo. O aluno foi **APROVADO** pela Banca Examinadora, por unanimidade, em cumprimento ao requisito exigido para obtenção do Título de Mestre em Meteorologia. As correções sugeridas pela banca examinadora deverão ser incorporadas no texto pelo aluno. A revisão final será realizada pelo membro banca Prof. Dr. Claudine Dereczynski.

Eu, Chou Sin Chan, como Presidente da Banca Examinadora, assino esta ATA em nome de todos os membros.

Membros da Banca:

Dr. Jose Antonio Marengo Orsini (orientador) - CEMADEN - INPE

Dra. Chou Sin Chan - CPTEC - INPE

Dra. Claudine Dereczynski - UFRJ Universidade Federal do Rio de Janeiro



Documento assinado eletronicamente por **Chou Sin Chan, Pesquisadora**, em 25/01/2021, às 19:03 (horário oficial de Brasília), com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site <http://sei.mctic.gov.br/verifica.html>, informando o código verificador **6403296** e o código CRC **848EDF75**.

À minha esposa, Amanda, e aos meus avós Ana e Adonias, que me ajudaram muito nessa trajetória.

Com amor.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente a Deus, por me dar forças, ânimo e capacidade de chegar até aqui.

Agradeço a minha esposa, Amanda, por todo cuidado, atenção, compreensão, paciência e suporte durante todos esses anos, desde a graduação.

Agradeço a minha família por todo suporte, por tudo o que me proporcionaram e se dedicaram para que pudesse completar mais essa fase da minha vida. Agradeço em especial meus avós Ana e Adonias por me educarem da melhor forma possível e me ajudarem a ser quem sou hoje. Agradeço pelos meus pais Paula e Kleiber, por mesmo de longe estarem perto, me dando apoio e cuidado. Agradeço a meus tios João e Júnior por todos os conselhos e ajuda.

Ao meu orientador, Jose Marengo, pela oportunidade, pelas dicas, pela compreensão e pelo apoio.

Aos meus colegas da PGMET pelo apoio e ajuda em vários momentos, pelo convívio e troca de experiências. Em especial agradeço ao Luciano, a Carol e o Mateus por me ajudarem com os scripts e programas. Não teria conseguido sem vocês. Agradeço aos colegas que dividiram o alojamento em Cachoeira Paulista durante o período do mestrado. A amizade, as risadas e o convívio foram muito importantes.

À PGMET pelos auxílios e pela colaboração ao longo desses anos de mestrado.

À Fundação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - CAPES pelo auxílio através da bolsa de mestrado.

“Tempestades certamente irão nos alcançar.
Longe, no alto mar, sem uma estrela a nos guiar.

Mas a calma virá
Com águas tranquilas em mãos
Na luz que dá nome a manhã
Mais perto estaremos do lar”.

(Os Arrais)

RESUMO

A região Sudeste do Brasil é a região brasileira que concentra a maior parte da população e a que movimenta a maior parte da economia do país. Mas, como em todo o Brasil, carece de infraestrutura adequada para prevenção de eventos meteorológicos extremos que interferem na dinâmica da sociedade e da economia. Os eventos de precipitação intensa são caracterizados por apresentarem elevados acumulados de precipitação em um curto período. O presente trabalho visa estudar a tendência de eventos de precipitação intensa na Região Metropolitana do Rio de Janeiro e nas cidades adjacentes, no período chuvoso da região definido entre outubro e abril, sendo considerada para o estudo a série compreendida entre outubro de 1985 e abril de 2019. Para tanto, foram considerados como eventos de precipitação intensa os dias em que a precipitação foi superior ao percentil de 95%. Para análise estatística de tendência da série temporal foi utilizado o teste de Mann-Kendall. Para análise da intensidade e frequência dos eventos de precipitação intensa, foram adotados quatro índices de extremos (R30mm, Rx1day, Rx5day e CWD). Na análise de tendência de eventos, não se observou uma tendência estatisticamente significativa, enquanto na análise dos índices de extremos, foram observados aumentos nos valores de máxima precipitação diária, na máxima precipitação em 5 dias consecutivos e diminuição no número de dias com precipitação. Na segunda parte do estudo, procurou-se identificar os padrões atmosféricos médios associados ao período chuvoso da região e os padrões médios associados aos dias com precipitação superior ao percentil de 95%, através da análise de funções ortogonais empíricas (EOF). Foram analisadas as três primeiras componentes principais de seis campos atmosféricos. Três estudos de caso foram realizados para identificar os sistemas atuantes e relacionar os eventos de precipitação intensa com os desastres naturais provocados por eles. Por fim, procurou-se fazer uma breve análise das implicações dos eventos de precipitação intensa na sociedade.

Palavras-Chave: Tendência; Precipitação Intensa; Rio de Janeiro; Mann-Kendall; EOF; Desastres Naturais.

OBSERVED TRENDS OF INTENSE PRECIPITATION EVENTS IN THE METROPOLITAN REGION OF RIO DE JANEIRO AND ADJACENT AREAS

ABSTRACT

The Southeastern region of Brazil is the Brazilian region that concentrates most of the population and that which moves most of the economy of the country. But, as in all of Brazil, it lacks adequate infrastructure to prevent extreme weather events that interfere with the dynamics of society and the economy. The events of intense precipitation are characterized by their high accumulation of exclusion in a short period. The present work aims to study the trend of events of intense precipitation in the Metropolitan Region of Rio de Janeiro and in the adjacent areas, in the rainy period of the region defined between October and April, being considered for the study the series between October 1985 and April 2019. For this purpose, the days on which the precipitation was higher than the 95% percentile were considered as events of intense precipitation. Mann-Kendall test was used for statistical analysis of the time series trend. For the analysis of the intensity and quantity of the events of intense precipitation, four extremes' indexes were adopted (R30mm, Rx1day, Rx5day and CWD). In the trend analysis of events, there was no statistically significant trend, while in the analysis of the extreme indices, there were increases in the values of maximum daily precipitation, maximum precipitation in 5 consecutive days and decrease in the number of days with precipitation. In the second part of the study, we tried to identify the average atmospheric patterns associated with the rainy season in the region and the average patterns associated with days with precipitation above the 95% percentile, through the analysis of empirical orthogonal functions (EOF). The first three main components of six atmospheric fields were analyzed. Three case studies were carried out to identify the active systems and relate the events of intense precipitation to the natural disasters caused by them. Finally, an attempt was made to make a brief analysis of the implications of the events of intense precipitation in society.

Keywords: Tendency. Intense Precipitation. Rio de Janeiro. Mann-Kendall. EOF, Natural Disasters.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Média anual de precipitação, em mm, na região Sudeste do Brasil, no período de 1981-2016.	1
Figura 2.1 – Configuração ZCAS pela imagem de satélite do GOES-13, no dia 05/11/2013.	11
Figura 2.2 – Configuração do sistema durante a Frente Fria.	14
Figura 2.3 – Exemplo de Linha de Instabilidade vista na imagem Maxxcappi do radar de São Roque, no dia 30/10/2010 às 15Z.....	15
Figura 2.4 – Esquema de funcionamento da Brisa Marítima.....	17
Figura 3.1 – Mesorregião Metropolitana do Rio de Janeiro (MMRJ).	21
Figura 3.2 – Precipitação média mensal na MMRJ, a partir dos dados do CHIRPS.....	22
Figura 4.1 – Comparação das médias mensais de precipitação do CHIRPS e do Sistema Alerta Rio.	34
Figura 4.2 – Série temporal de precipitação diária, em mm, entre outubro de 1985 e abril de 2019.....	35
Figura 4.3 – Tendência de eventos com precipitação diária superior a 30 mm.	39
Figura 4.4 – Tendência de máximos acumulados diários de precipitação.	40
Figura 4.5 – Tendência de máximo de precipitação em cinco dias consecutivos.....	42
Figura 4.6 – Tendência de dias consecutivos com precipitação superior a 1mm.	43
Figura 4.7 – Primeira Componente Principal.....	47
Figura 4.8 – Primeira Componente Principal.....	49
Figura 4.9 – Segunda Componente Principal.....	52
Figura 4.10 – Segunda Componente Principal.....	54
Figura 4.11 – Terceira Componente Principal.....	56
Figura 4.12 – Terceira Componente Principal.....	58
Figura 4.13 – Atuação de Frente Fria entre os dias 4 e 6 de abril de 2010.	61
Figura 4.14 - Análise do dia 04 de abril de 2010 com foco na região Sudeste.	62
Figura 4.15 – Dias 11, 12 e 13 do evento de ZCAS de janeiro de 2011.	63
Figura 4.16 – Dias 14, 15 e 16 do evento de ZCAS de janeiro de 2011.	66

Figura 4.17 - Análise do período de 11 a 16 de janeiro de 2011 na região Sudeste.....	68
Figura 4.18 – Dias 11, 12 e 13 do evento de ZCAS de janeiro de 2016.	70
Figura 4.19 – Dias 14, 15 e 16 do evento de ZCAS de janeiro de 2016.	72
Figura 4.20 - Análise do dia 16 de janeiro de 2016 com foco na região Sudeste.....	75
Figura A.1 – Médias mensais de precipitação (mm) na MMRJ, no período de 1985 a 2019.	93

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1 – Precipitação média diária, percentil, teste de Mann-Kendall e Curvatura de Sen.	35
Tabela 4.2 – Teste de Mann-Kendall e Curvatura de Sen para o índice R30mm.....	38
Tabela 4.3 – Teste de Mann-Kendall e Curvatura de Sen para o índice Rx1day.....	40
Tabela 4.4 – Teste de Mann-Kendall e Curvatura de Sem para o índice Rx5day.....	41
Tabela 4.5 – Teste de Mann-Kendall e Curvatura de Sen para o índice CWD.....	43

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

- ASAS** Alta Subtropical do Atlântico Sul
- Cb** Nuvens cumulonimbus
- CCM** Complexo Convectivo de Mesoescala
- CEMADEN** Centro Nacional de Monitoramento e Alerta de Desastres Naturais
- Cemaden** Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais
- CHIRPS** Climate Hazards Group Infrared Precipitation With Stations
- CHPClim** Acumulado mensal climatológico de precipitação
- CP** Componente Principal
- CPC** Climate Prediction Center
- ECMWF** European Centre For Medium-Range Weather Forecasts
- ENOS** El Niño – Oscilação Sul
- EOF** Funções Ortogonais Empíricas
- EOF** Funções Ortogonais Empíricas
- ETCCDI** Expert Team on Climate Change Detection and Indexes
- FF** Frente Fria
- hPa** Hectopascal
- IBGE** Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
- INMET** Instituto Nacional De Meteorologia
- JBN** Jato de baixos níveis
- LI** Linha de Instabilidade
- MK** Mann-Kendall
- MMRJ** Mesorregião metropolitana do Rio de Janeiro
- MSWEP** Multi-Source Weighted-Ensemble Precipitation
- NCDC** National Climate Data Center
- NO** Noroeste
- NOAA** National Oceanic and Atmospheric Administration
- PCA** Análise de Componentes Principais

PNMM Pressão Ao Nível Médio Do Mar
RMRJ Região Metropolitana do Rio de Janeiro
RMSP Região Metropolitana de São Paulo
RSRJ Região Serrana do Rio de Janeiro
SCM Sistema Convectivo de Mesoescala
SE Sudeste
SPI Índice de Precipitação Padronizado
TRMM Tropical Rainfall Measuring Mission
WMO World Meteorological Organization
ZCAS Zona de Convergência do Atlântico Sul
ZCPS Zona de Convergência do Pacífico Sul

LISTA DE SÍMBOLOS

P_i Percentil de uma variável *i*.

α Nível de significância

MK Teste de Mann-Kendall

S Distribuição estatística

VAR Variância

H₀ Hipótese Nula

Sen Curvatura de Sen

Cov Covariância

S Matriz de Covariância

I Matriz Identidade

λ Autovalor

VE Variância Explicada

σ Desvio Padrão

SUMÁRIO

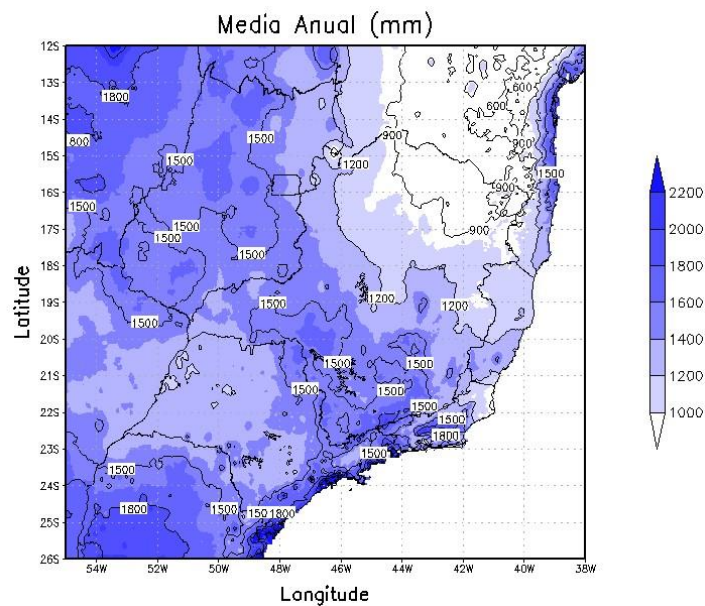
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 Objetivos	8
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	9
2.1 Climatologia de precipitação no estado do Rio de Janeiro.....	9
2.2 Zona de Convergência do Atlântico Sul	11
2.3 Sistemas frontais.....	12
2.4 Sistema Convectivo de Mesoescala.....	14
2.5 Brisa marítima	16
2.6 Revisão bibliográfica	17
3 MATERIAIS E MÉTODOS.....	21
3.1 Área de estudo	21
3.2 Período de estudo	21
3.3 Dados.....	22
3.4 Metodologia.....	24
3.4.1 Teste de Mann-Kendall	25
3.4.2 Curvatura de Sen	27
3.4.3 Análise de tendências	28
3.4.4 Funções Ortogonais Empíricas	28
3.4.5 Estudos de casos	31
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	33
4.1 Série temporal e tendência de eventos de precipitação intensa	33
4.2 Análise dos índices de extremos.....	37
4.3 Análise dos padrões atmosféricos por meio de EOF	45
4.3.1 Primeira Componente Principal.....	46
4.3.2 Segunda Componente Principal.....	51
4.3.3 Terceira Componente Principal.....	56
4.4 Estudos de casos	60
4.4.1 Evento: 3 a 6 de abril de 2010.....	60
4.4.2 Evento: 10 a 18 de janeiro de 2011.....	63
4.4.3 Evento: 12 a 16 de janeiro de 2016.....	69

4.5 Discussões	76
5 CONCLUSÃO.....	79
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	83
APÊNDICE A - CAMPOS DE MÉDIAS MENSAIS DE PRECIPITAÇÃO NA MESORREGIÃO METROPOLITANA DO RIO DE JANEIRO.....	93

1 INTRODUÇÃO

A região Sudeste do Brasil apresenta uma grande variabilidade climática em relação à precipitação anual, com médias inferiores a 900 mm/ano no norte de Minas Gerais, e superiores a 1800 mm/ano em algumas regiões dos litorais de São Paulo e Rio de Janeiro (Figura 1.1).

Figura 1.1 – Média anual de precipitação, em mm, na região Sudeste do Brasil, no período de 1981-2016.



Dados: CHIRPS

A região Sudeste é uma região de transição entre os climas de latitudes baixas e latitudes médias, possui uma grande variabilidade climática devido a sua latitude (entre 15°S e 25°S), sua longitude (desde a costa do Atlântico até a divisa com a região Centro-Oeste) e o relevo acidentado.

Esses aspectos favorecem uma variabilidade em relação a temperatura e precipitação, sendo que de uma forma geral, a região apresenta duas estações bem definidas: chuvosa e quente no período do verão e seca com temperaturas mais baixas no inverno.

Criada em 1974, a Região Metropolitana do Rio de Janeiro (RMRJ) é uma região que engloba, atualmente, vinte e dois municípios. Além da capital, Rio de Janeiro, as cidades pertencentes a região, são: Belford Roxo, Cachoeiras de Macacu, Duque de Caxias, Guapimirim, Itaboraí, Itaguaí, Japeri, Magé, Maricá, Mesquita, Nilópolis, Niterói, Nova Iguaçu, Paracambi, Petrópolis, Queimados, Rio Bonito, São Gonçalo, São João de Meriti, Seropédica e Tanguá (IBGE, 2019). A RMRJ dispõe da segunda maior concentração populacional do país, com aproximadamente 13,1 milhões de habitantes em uma área de cerca de 7,5 mil m² (IBGE, 2020).

Além da importância no âmbito populacional, a RMRJ exerce grande influência econômica e logística no país. Depois da Região Metropolitana de São Paulo, é a região mais rica e desenvolvida economicamente, com o segundo maior PIB do país e uma das 20 maiores metrópoles do mundo (IBGE, 2010). A proximidade com o oceano, colabora para a logística no país, em virtude do complexo portuário formado pelos portos do Rio de Janeiro e de Itaguaí (EGLER E GUSMÃO, 2011).

Anexada a RMRJ pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), para fins de estudos, as cidades de Engenheiro Paulo de Frontin, Mangaratiba, Mendes, Miguel Pereira, Paty de Alfenes, São João do Vale do Rio Preto, Teresópolis e Vassouras, formam junto a RMRJ, a Mesorregião Metropolitana do Rio de Janeiro (MMRJ), região foco do estudo.

Ao longo dos últimos anos, nota-se que os eventos extremos relacionados à precipitação vêm causando grandes impactos no Brasil e no mundo. Um evento extremo de precipitação é classificado como um evento que pode deflagrar desastres naturais em áreas vulneráveis. Entende-se por desastre natural o impacto que um fenômeno de caráter natural causa sobre a sociedade, promovendo danos e prejuízos que excedem a capacidade da população de conviver com o respectivo impacto (TOBIN; MONTZ, 1997; MARCELINO, 2008).

De acordo com Song et al. (2011), mudanças na quantidade total de precipitação na estação chuvosa se manifestam normalmente de três maneiras: variações na

frequência de ocorrência de dias úmidos, variações na intensidade da precipitação, ou a ocorrência conjunta dos dois anteriores. O estudo desses fatores torna possível uma melhor compreensão das contribuições individuais para a variabilidade e as mudanças na precipitação durante a estação chuvosa.

De acordo com o Atlas Brasileiro de Desastres Naturais (CEPED-UFSC, 2013), na região Sudeste do Brasil, principal região do país, muitas são as ocorrências de inundações e deslizamentos provocados pelas chuvas intensas, principalmente nos estados de São Paulo e Rio de Janeiro. Entre 1991 e 2012, foram registrados 591 casos de enxurradas e 236 inundações no estado de São Paulo e 251 enxurradas e 190 casos de inundações no estado do Rio de Janeiro.

Os desastres naturais provocados por eventos hidrometeorológicos revelam a vulnerabilidade dessas regiões. Regiões que possuem certa fragilidade, que são suscetíveis a precipitação intensa, sofrem com os prejuízos desses eventos.

Torres et al. (2020), em documento para a Macro Metrópole de São Paulo, sugerem que o aumento na frequência e intensidade de eventos de precipitação intensa e um prolongamento do período seco deixa a crítica a questão da disponibilidade hídrica, sendo imprescindível um planejamento. Esse aumento de eventos extremos de precipitação, somado ao aumento da urbanização e aumento de áreas impermeáveis, faz com que o escoamento da água siga em direção a rios e córregos, que por sua vez são canalizados. Porém, a infraestrutura inadequada de drenagem não é suficiente para o manejo dessa água, implicando em eventos de inundações, enchentes e alagamentos.

Ainda de acordo com Torres et al. (2020), há preocupação com áreas de risco de deslizamentos e, conseqüentemente, com a população dessas áreas, que ficam vulneráveis devido a intensidade das chuvas, uma vez que, depois de úmido, o solo perde a capacidade de absorção de água e passa a ser suscetível à ocorrência de deslizamentos.

Os impactos das intensas precipitações são conhecidos em toda a MMRJ, sendo uma das regiões brasileiras com maior grau de ocorrência de desastres devido

a eventos extremos de precipitação, que causam perdas humanas e econômicas na sociedade local. Somente nas cidades de Petrópolis, São Gonçalo e Niterói ocorreram, respectivamente, 18, 16 e 8 casos de deslizamento entre os anos 1991 e 2012 (CEPED-UFSC, 2013).

Recentes eventos de desastres naturais podem ser ligados aos eventos extremos de precipitação no Brasil e, principalmente, nos estados de São Paulo e Rio de Janeiro.

Na cidade de São Paulo, no início de fevereiro de 2020, ocorreu intensa precipitação (114 milímetros em 24 horas), o segundo maior volume desde 1943 segundo o Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). Eventos dessa magnitude têm se tornado comum na RMSP e na RMRJ (MARENGO et al., 2020).

As análises feitas por Marengo et al. (2020) indicam aumento na ocorrência de dias com chuva forte e na frequência de eventos extremos de precipitação na RMSP, particularmente na primavera e no verão. Na RMSP, o número de dias secos consecutivos também aumentou gradualmente, sugerindo que os eventos de chuva intensa estão concentrados em menos dias, espaçados entre períodos mais longos de seca.

Em 2010 na cidade de Angra dos Reis (RJ), onde, em reportagem publicada no site do IG, devido às fortes chuvas houve deslizamento na madrugada do dia 1º de janeiro, 53 pessoas vieram a óbito. Três meses depois, no dia 5 de abril, enchentes e deslizamentos afetaram a RMRJ e no dia 7 de abril houve grande deslizamento da cidade de Niterói, com 47 mortes.

Em 2011, inundações e deslizamentos ocorreram na Região Serrana do Rio de Janeiro (RSRJ), onde, de acordo com reportagens do site G1, o evento foi considerado como uma das maiores tragédias climáticas do país. O evento ocorrido em virtude da atuação de uma Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS), com acumulados diários expressivos de chuva, resultou em 916 mortes

em 7 cidades da região, além de deixar cerca de 35 mil pessoas desabrigadas (MARENGO; ALVES, 2012).

No início de abril de 2019, entre os dias 8 e 10, um elevado índice de precipitação atingiu o Rio de Janeiro. De acordo com os dados apresentados das estações pluviométricas do município, das 33 estações, sete apresentaram valores superiores a 300 mm em 24 horas, sendo quase o triplo do esperado para o mês de abril na cidade, e só quatro das estações apresentaram acumulados inferiores a 100 mm.

A intensa precipitação gerou grandes transtornos na RMRJ, com enchentes e deslizamentos, fazendo a rede municipal de ensino ter as aulas suspensas, além de implicar em 10 óbitos na cidade do Rio de Janeiro, segundo as informações publicadas na reportagem feita pelo UOL.

Como observado nos casos acima, o problema em relação aos desastres ocorridos pela precipitação extrema está na má distribuição espacial da chuva e na vulnerabilidade das regiões. O crescimento populacional, somado a mudança da paisagem, impermeabilização do solo e a falta de planejamento urbano, de saneamento e infraestrutura, dificultam a vida da população que fica mais exposta aos eventos nas áreas de risco, que muitas vezes são ocupadas de forma ilegal.

Dunn et al. (2020) observaram que, em todo o globo, a precipitação possui uma distribuição heterogênea e a partir da análise dos índices de extremos de precipitação, indicaram que há uma tendência de aumento de eventos de precipitação intensa, contribuindo para uma maior fração do total de precipitação em um período de tempo menor.

Considerando os impactos dos eventos de precipitação intensa, Dereczynski et al. (2013), analisaram extremos de precipitação e temperatura do ar no presente, a partir da climatologia base no período de 1961-1990, para a cidade do Rio de Janeiro. Duas estações, em pontos diferentes, foram definidas como base no estudo: uma na Zona Oeste, onde há temperatura mais elevada, maior

concentração populacional e menor precipitação e uma no Alto da Boa Vista, que fica no Maciço da Tijuca, em que a temperatura é menor, há mais vegetação e maior precipitação.

De uma forma geral, pelos resultados obtidos, foi observado um aumento nos acumulados anuais de precipitação com um aumento, também, de precipitações extremas e períodos secos mais longos. Essa análise permite notar que há uma tendência positiva de aumento na quantidade e intensidade dos eventos extremos de precipitação, bem como uma distribuição mais irregular da mesma ao longo do ano.

Pristo et al. (2018) estudaram eventos de precipitação intensa no município do Rio de Janeiro entre 1997 e 2016 e observaram que 6,6 eventos de precipitação intensa são responsáveis por 33% da precipitação anual da cidade, com a maioria dos casos ocorrendo no período do verão, que é o período chuvoso da região. No mesmo período analisado, os autores constataram uma tendência de aumento no número de eventos.

Essas mudanças observadas no regime de chuvas extremas, somadas à ocupação de áreas de risco, desencadearam um aumento de desastres de caráter hidrometeorológico nos últimos anos (MARENGO et al., 2020). Conforme indicado pelos autores, um evento de precipitação extrema não se caracteriza em um desastre natural sozinho. Como descrito anteriormente, os desastres naturais são aqueles que afetam a população e são resultado da combinação de fatores meteorológicos, urbanos, econômicos e sociais.

Ainda de acordo com Marengo et al. (2020), o estado de São Paulo apresenta as maiores estatísticas de inundação (33,36% do número de casos), sendo seguido por Santa Catarina (11,25%), Rio Grande do Sul (9,06%), Paraná (8,33%), Rio de Janeiro (7,28%) e Minas Gerais (5,96%). Logo, observa-se que as regiões Sudeste e Sul do Brasil são as mais afetadas por desastres do tipo hidrometeorológicos devido a maior densidade populacional.

Por outro lado, quando se busca formas de prevenção e mitigação, os danos causados por eventos extremos de precipitação tendem a ser minimizados. A resiliência é a perspicácia de observar um evento, se antecipar a ela e se adaptar para manter uma segurança e minimizar os danos provocados por esse evento. Uma cidade que procura ser resiliente possui organização da infraestrutura, urbanização sustentável e controle de ocupação desordenada, principalmente de áreas de risco (AMORIM et al., 2014).

Baseando-se nos eventos observados recentemente e em estudos já realizados, a motivação para a realização do presente estudo é a possibilidade de analisar as tendências de eventos de precipitação intensa em uma região que vem sofrendo com os impactos de chuvas extremas ao longo dos últimos anos.

A escolha pela MMRJ foi feita, uma vez que pela análise da revisão bibliográfica levantada, nota-se que os trabalhos são focados para um estado, uma cidade específica, como a própria cidade do Rio de Janeiro, uma determinada região do Brasil, como Sudeste e Nordeste, ou mesmo todo o continente.

Tendo a região definida como foco, analisar se, ao longo dos últimos anos, há uma tendência de aumento ou diminuição nos eventos de precipitação intensa, na intensidade dos eventos, ou mesmo em ambas as situações e observar possíveis padrões associados a eventos que tiveram grande impacto na região.

Para cumprir os objetivos propostos neste trabalho, uma descrição mais detalhada da climatologia da região, os principais sistemas precipitantes e uma revisão bibliográfica de estudos relacionados a eventos extremos de precipitação, são apresentados no Capítulo 2. No Capítulo 3, são apresentados os dados e a metodologia utilizados para realização deste estudo, com uma breve descrição dos dados de precipitação e dos métodos estatísticos utilizados. O Capítulo 4 apresenta os resultados obtidos. Por fim, no Capítulo 5, são apresentadas as conclusões do estudo realizado.

1.1 Objetivos

Nesse trabalho, o foco é exclusivamente a Mesorregião Metropolitana do Rio de Janeiro (MMRJ), que apresenta um histórico vulnerável a eventos de precipitação volumosa (SILVA; DEREZYNSKI, 2010; ÁVILA et al., 2016), procurando caracterizar os eventos chuvosos extremos na MMRJ, região que inclui a RMRJ além de outros municípios da Região Serrana do Rio de Janeiro (RSRJ) e do Centro-Sul do Estado.

Com isso, o objetivo geral deste trabalho consiste em avaliar tendências na ocorrência de eventos de precipitação intensa na MMRJ no período mais chuvoso da região (outubro a abril). Para isso, dados do projeto Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Stations (CHIRPS) (FUNK et al., 2015) serão usados no período de outubro de 1985 a abril de 2019. Além disso, objetiva-se identificar possíveis tendências desses extremos em quantidade de eventos e/ou intensidade dos mesmos e relacionar eventos provocados por sistemas precipitantes com as implicações sociais e econômicas em decorrência desses eventos.

Como objetivos específicos, destacam-se:

- a) Quantificar os eventos de precipitação intensa em escala diária;
- b) Definir se há tendência de ocorrência desses eventos;
- c) Analisar os padrões atmosféricos médios no período chuvoso da região por meio de Funções Ortogonais Empíricas;
- d) Realizar três estudos de caso de eventos de precipitação intensa que implicaram em problemas socioeconômicos na região;
- e) Discutir os riscos de desastres naturais em decorrência de eventos de precipitação intensa na MMRJ e tendências na ocorrência de desastres.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O clima de uma região é influenciado diretamente não somente pelas variáveis meteorológicas, mas, também, por fatores geográficos. No que diz respeito à MMRJ, a atuação dos principais sistemas precipitantes na região, sofrem influência do relevo e da maritimidade.

Os sistemas meteorológicos que produzem e modulam a precipitação, tais como a Zona de Convergência do Atlântico Sul, os Sistemas Frontais, os Sistemas de Mesoescala e as Brisas, impactam a sociedade e a economia da MMRJ. Em alguns casos, os acumulados pluviométricos (diários, mensais, sazonais e anuais) são muito mais intensos do que suas médias climatológicas, caracterizando um evento de precipitação intensa.

Isso leva a importantes consequências sociais (BARBOSA, 2007), pois em algumas ocasiões esses eventos implicam em desastres de caráter natural, com prejuízos à sociedade e à economia da região, visto que muitas áreas estão suscetíveis a inundações e deslizamentos em virtude da inadequada infraestrutura.

Neste Capítulo, serão abordados sucintamente a climatologia da precipitação no estado do Rio de Janeiro, o conceito dos sistemas precipitantes que mais atuam sobre o estado e uma revisão da literatura sobre alguns trabalhos já produzidos no Brasil a respeito dos eventos de precipitação intensa.

2.1 Climatologia de precipitação no estado do Rio de Janeiro

Seguindo a classificação de Köppen, em que há uma correspondência entre dados de clima (precipitação e temperatura médias mensais) e os limites geográficos de tipos de vegetação (DUBREUIL et al., 2018), o estado do Rio de Janeiro é definido majoritariamente com o clima tropical atlântico (Aw) (ALVARES et al., 2013). Isso significa que seu clima sofre influência direta da maritimidade, tendo baixa amplitude térmica, verão quente e úmido e inverno mais ameno e com precipitação mais baixa.

Além das variáveis meteorológicas, a geografia da região influencia na modulação da precipitação no estado e em especial na MMRJ.

A proximidade com o oceano faz da maritimidade um dos fatores que mais influenciam a precipitação na MMRJ. Além da maritimidade, a região possui um relevo heterogêneo, tendo interação entre os processos tectônicos e a dinâmica da costa, abrangendo maciços e duas baías, que influenciam na modulação da precipitação na região, em virtude da orografia.

O Maciço da Tijuca divide as zonas Norte e Sul da cidade do Rio de Janeiro. O Maciço Gericinó-Medanha delimita a cidade na Zona Norte e o Maciço da Pedra branca localiza-se a oeste. Além desses, existem o Maciço de Niterói, a serra carioca, o corcovado e o Pão de Açúcar. A Baía de Guanabara delimita o Rio de Janeiro na porção leste, a Baía de Sepetiba delimita a cidade do Rio de Janeiro na porção oeste e ao sul da RMRJ temos o Oceano Atlântico (EGLER; GUSMÃO, 2011; DEREZYNSKI et al., 2009).

Essa estrutura geográfica no estado faz com que os acumulados anuais de precipitação variem com a altitude.

De acordo com Silva e Dereczynski (2014) a divisa entre a RMRJ e a Região Serrana, apresenta uma média anual superior a 2500 mm. A região da baixada apresenta os menores acumulados, com uma precipitação anual entre 700 e 1300 mm. A região englobada pelo Vale do Paraíba tem acumulados entre 1300 e 2200 mm/ano. A RMRJ apresenta valores médios entre 1000 e 1600 mm/ano, com exceção do Maciço da Tijuca que apresenta valores próximos a 2500 mm/ano.

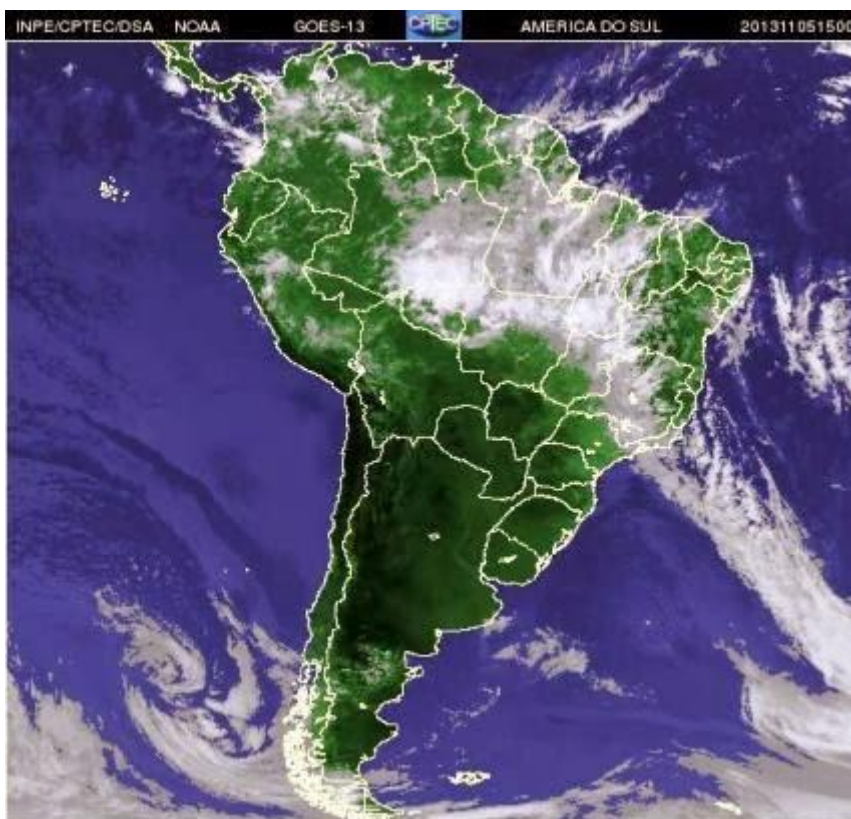
Ainda de acordo com Silva e Dereczynski (2014), a distribuição espacial da precipitação segue um período sazonal, com maiores índices no verão, com diminuição considerável no inverno.

2.2 Zona de Convergência do Atlântico Sul

Kousky (1988) ressalta que a Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) pode ser identificada como uma banda de nebulosidade, com baixa radiação de onda longa emergente e chuva persistente, estendendo-se na direção noroeste-sudeste, desde a Bacia Amazônica até o Oceano Atlântico Sul (Figura 2.1). As regiões normalmente afetadas pela ZCAS incluem o Norte, Centro-Oeste e Sudeste do Brasil, onde se localiza a MMRJ.

De acordo com Escobar et al. (2021), a partir de um levantamento de eventos de ZCAS sobre o Brasil entre outubro e abril do período 2006-2016, dos 95 eventos que ocorreram no Brasil, 77 (81%) atingiram a cidade do Rio de Janeiro. E desses 77 eventos, em 37 casos (48%), ocorreu pelo menos um dia de chuva intensa na cidade.

Figura 2.1 – Configuração ZCAS pela imagem de satélite do GOES-13, no dia 05/11/2013.



Fonte: CPTEC/INPE (2020).

Para ocorrer a manutenção da ZCAS é imprescindível a convergência do fluxo de umidade sobre a região de atuação (KODAMA, 1993). Isso, se dá pela atuação do Jato de Baixos Níveis a leste dos Andes que transporta a umidade da Amazônia para as regiões sul e sudeste do Brasil (REBOITA et al., 2010) durante o verão, fazendo parte do regime de monção na América do Sul (GAN et al., 2009).

Kodama (1992) identificou quatro características da ZCAS que se assemelham à Zona de Convergência do Pacífico Sul (ZCPS), sendo elas:

- a) extensão para leste nos subtrópicos;
- b) formação ao longo de jatos subtropicais à leste do cavado;
- c) zona de convergência úmida, espessa e baroclínica; e
- d) localização na fronteira de massas de ar tropical, com geração de instabilidade convectiva.

Para definir a configuração da ZCAS, uma das metodologias mais adotadas é a utilizada por Quadro (1994):

- Convergência de umidade na baixa troposfera (850 hPa);
- Movimento ascendente do ar orientado na direção NO-SE;
- Cavado semiestacionário sobre a América do Sul, a leste da Cordilheira dos Andes com a mesma orientação, no nível de 500 hPa;
- Gradiente de temperatura potencial equivalente a sul da ZCAS na média troposfera;
- Vorticidade anticiclônica em altos níveis;
- Precipitação associada com duração mínima de quatro dias.

2.3 Sistemas frontais

Os Sistemas Frontais são sistemas formados pelo encontro de duas massas de ar com temperatura e densidade diferentes. O sistema frontal com maior ocorrência sobre a região é a Frente Fria (Figura 2.2). A Frente Fria ocorre quando a massa de ar frio faz a massa de ar quente ascender, por essa ser

menos densa. Na passagem da Frente Fria há formação de nebulosidade e precipitação, definida como precipitação pré frontal (REBOITA et al., 2012). As Frentes Frias podem atuar durante o ano todo na costa leste do Brasil, onde se localiza a RMRJ, com maior frequência durante o inverno e servindo como fonte para alimentação da ZCAS, no verão (CAVALCANTI; KOUSKY, 2009).

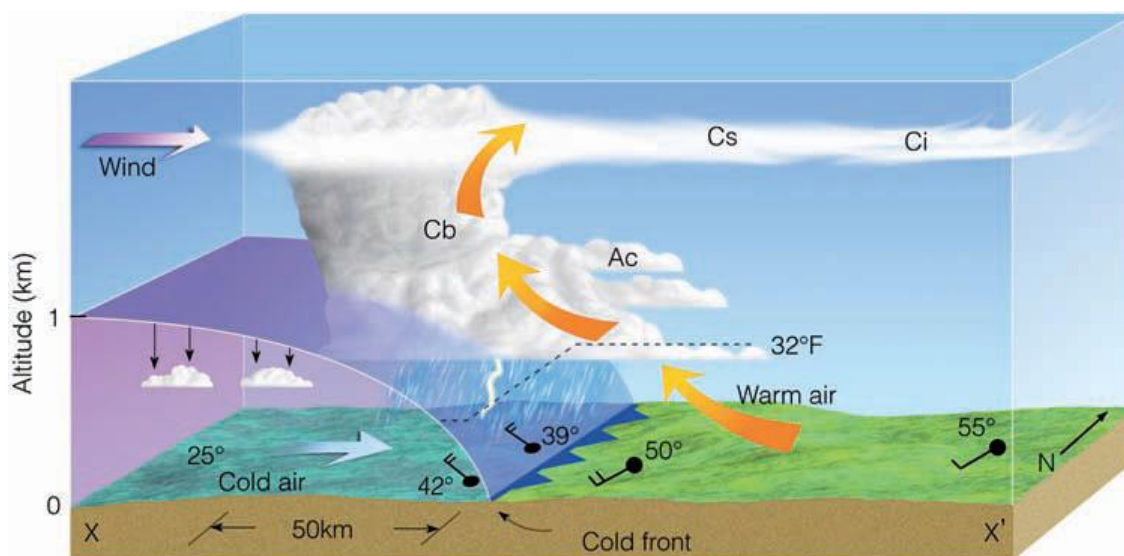
Sobre o Estado do Rio de Janeiro, a maior frequência de ocorrência de sistemas frontais ocorre entre maio e outubro, com cerca de 3,6 sistemas por mês (Bonnet et al., 2018).

De acordo com Cavalcanti e Kousky (2009), a Frente Fria pode ser identificada seguindo pelo menos três critérios, a partir dos campos de temperatura do ar, pressão ao nível médio do mar (PNMM) e vento:

- a) gradiente de temperatura em 925 hPa (diminuição de, pelo menos, 2°C);
- b) aumento da PNMM em, pelo menos, 2 hPa;
- c) ocorrência de ventos de sul com intensidade de, pelo menos, 2 m.s⁻¹.

Ainda segundo os autores, as Frentes Frias no Brasil são mais frequentes no período do inverno do que no verão. Durante o verão, elas têm interação com o ar úmido e se localizam com frequência na costa do Brasil, entre São Paulo e Bahia, associando-se à ZCAS e, conseqüentemente, colaborando para a manutenção de longos períodos de chuva volumosa.

Figura 2.2 – Configuração do sistema durante a Frente Fria.



Fonte: Meteorology Today. Ahrens, (2009).

2.4 Sistema Convectivo de Mesoescala

Os Sistemas Convectivos de Mesoescala (SCMs) são conjuntos de tempestades que persistem por um período de 6 a 12 horas, com intensa precipitação convectiva e/ou estratiforme associada (HOUZE, 2004; COTTON, 2010 apud SEGALIN, 2012). Segundo Sakamoto (2009), a atuação conjunta do jato de baixos níveis (JBN), com a presença de cavado em 500 hPa, o aquecimento diurno da camada limite e uma circulação transversa são as condições preliminares para a formação de um SCM.

Temos como principais exemplos de SCM: as Linhas de Instabilidade e os Complexos Convectivos de Mesoescala (CCM), sendo que esse último não apresenta registro na MMRJ.

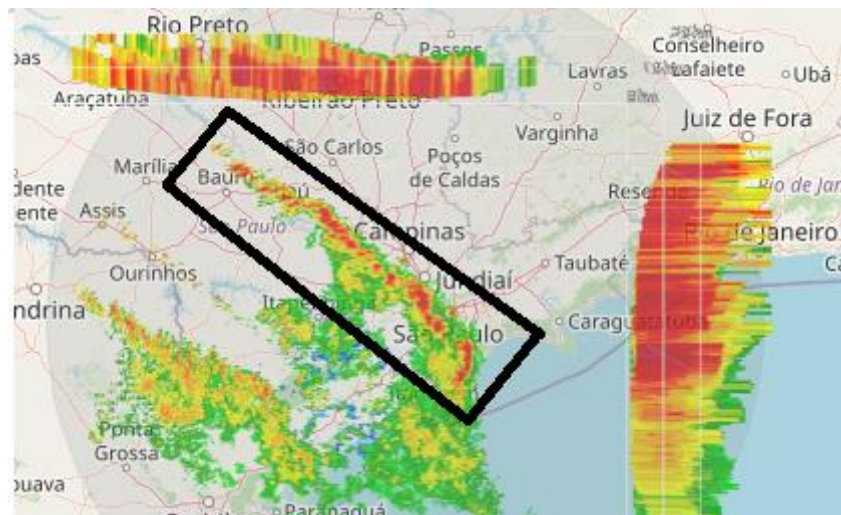
As Linhas de Instabilidade (Figura 2.3) consistem em um aglomerado de nuvens cumulonimbus (Cb) que possuem alinhamento horizontal sendo interligadas por uma região com nuvens estratiformes (HOUZE, 1993; apud HOUZE, 2004).

Garstang et al. (1994) descreveram as características das Linhas de Instabilidade da seguinte forma:

- A temperatura dos topos das nuvens associadas à Linha de Instabilidade pode ser menor que 212,8 K (altura aproximada de 13 a 14 km) e as nuvens do tipo Cb podem ter o topo com temperatura inferior a 192,8 K (entre 16 e 17 km de altura).
- Há convergência em baixos níveis e divergência em altitude da região de convecção.
- Há convergência em médios níveis e divergência em baixos e altos níveis na porção estratiforme.

As Linhas de Instabilidade costumam atuar na MMRJ principalmente em períodos pré-frontais, podendo também ser de origem tropical (REBOITA et al., 2010), como ocorrido em fevereiro de 2010 no Rio de Janeiro, implicando em acumulados superiores a 150 mm/dia nas estações do CEMADEN e do Alerta Rio.

Figura 2.3 – Exemplo de Linha de Instabilidade vista na imagem Maxxcappi do radar de São Roque, no dia 30/10/2010 às 15Z.



Fonte: REDEMET (2020).

2.5 Brisa marítima

O sistema de brisa ocorre na região de transição entre o continente e um grande corpo de água (mares e oceanos geralmente), sendo um sistema muito atuante nas regiões litorâneas.

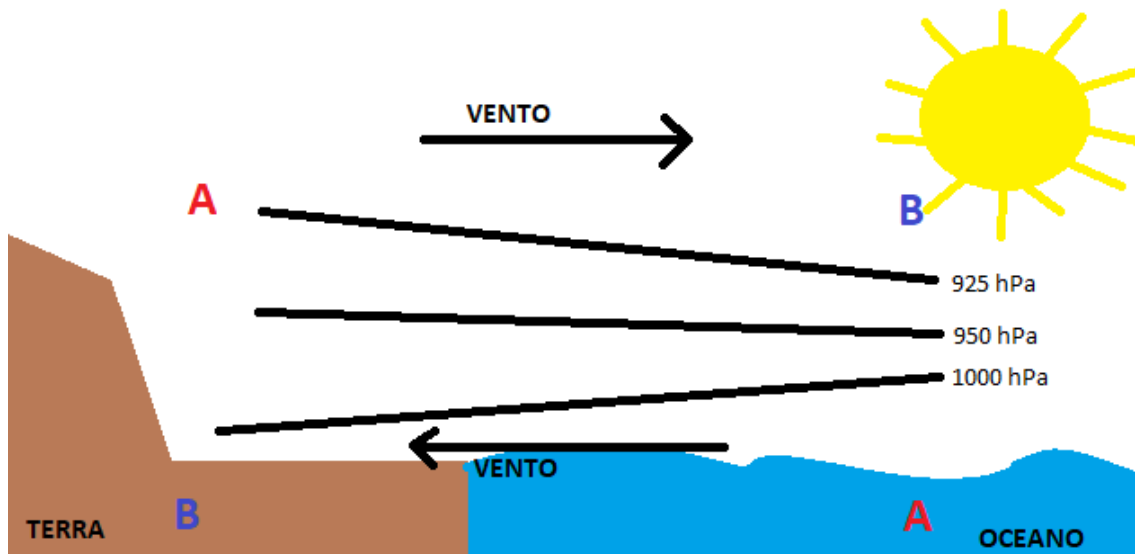
Durante o dia, em virtude da maior capacidade térmica, o oceano demora mais para aquecer do que a terra, isso gera um gradiente de temperatura entre o continente e o oceano, implicando em um gradiente de pressão entre ambos.

Como durante o dia o ar é mais quente no continente do que no oceano, o ar quente ascende formando uma baixa pressão relativa em superfície sobre o continente e uma alta sobre o oceano. O ar ascendente em terra, subside no oceano, fechando o ciclo diurno da brisa marítima.

O gradiente de pressão formado faz com que o vento “sopre” em direção ao continente durante o dia, levando umidade do oceano para o continente, colaborando para o processo de convecção (Figura 2.4).

Durante a noite o sistema se inverte, pois o ar sobre o continente resfria mais rápido do que sobre o oceano, fazendo com que a baixa pressão relativa em superfície fique sobre o oceano e o vento passe a soprar do continente para o oceano, sendo denominado de brisa terrestre (CAVALCANTI et al., 2009; SENA, 2016).

Figura 2.4 – Esquema de funcionamento da Brisa Marítima.



Na RMRJ a Brisa Marítima é um dos sistemas causadores de precipitação, mas não o principal, sendo responsável mais por chuvas estratiformes do que convectivas, estando associados à intensificação dos ventos de sul (DERECZYNSKI et al., 2009).

2.6 Revisão bibliográfica

Alguns estudos vêm sendo realizados em relação a eventos extremos de precipitação no Brasil, e em especial na região Sudeste, muito em virtude da importância significativa da região para o país.

Lima et al. (2008) estudaram, a partir de dados diários de precipitação das estações da Agência Nacional de Águas (ANA), a ocorrência de eventos extremos na região sudeste do Brasil, no período de 1960 a 2005, para a estação chuvosa da mesma (novembro a março). Os autores observaram que a maioria dos anos que houve grande frequência de eventos intensos de precipitação coincidiu com período de El Niño, sendo que os estados de São Paulo e Rio de Janeiro começaram a apresentar índices com frequência de extremos a partir de Janeiro.

Santos e Ynoue (2011) analisaram a variabilidade espacial e temporal dos eventos extremos de precipitação para o estado de São Paulo no período de 1979-2010. Os pesquisadores utilizaram dados diários de precipitação e consideraram como extremo chuvoso o limiar de 95%, observando que o verão é a estação com o maior número de extremos e o inverno, o menor.

Teixeira e Satyamurty (2011) analisaram as tendências de extremos de precipitação para as regiões Sul e Sudeste no período de 1960-2004, subdividindo os eventos em chuva pesada e extrema. Ao longo dos 45 anos de dados, observaram que tanto no Sudeste, quanto no Sul, houve uma tendência positiva, ou seja, um aumento no número de eventos, embora apenas a região Sul apresente uma tendência estatisticamente significativa.

Cavalcanti (2014) analisou a variabilidade da precipitação na região sudeste no período de 1985 a 2014 e a configuração de extremos de precipitação (chuvoso e seco) nesse período, a partir do índice SPI (Índice de Precipitação Padronizado). A pesquisadora observou que nos compostos, há a presença de um padrão do tipo dipolo, em relação à precipitação, entre a região sudeste do Brasil e a região SESA (região que engloba o sul do Brasil, Uruguai e norte da Argentina). Os casos chuvosos do mês de julho são associados a sistemas frontais, ao passo que, em janeiro, há anomalia negativa na pressão ao nível médio do mar (PNMM).

Ávila et al. (2016) estudaram a frequência de ocorrência de inundações e deslizamentos no sul e sudeste do Brasil analisando as mudanças espaço-temporais da precipitação no período de 1978 a 2014 com foco nos estados do Rio de Janeiro e Santa Catarina. Os pesquisadores observaram tendências positivas de precipitação anual e sazonal, com exceção da estação do inverno na região do Rio de Janeiro. Além disso, os autores detectaram correlações estatísticas positivas entre eventos de deslizamentos e precipitação anual máxima consecutiva de 1 dia e 5 dias.

Sena (2016) analisou a climatologia de precipitação no período de 1981-2010 e associou padrões atmosféricos aos eventos extremos chuvosos de precipitação

no estado de São Paulo, definindo como extremo o limiar de 99% e observando cinco padrões associados aos extremos.

Regoto et al. (2019) estudaram a tendência de eventos extremos de precipitação no Espírito Santo, no período de 1971 a 2010 a partir dos dados de precipitação diária de 80 estações da ANA. Os autores constataram que a frequência e a intensidade dos dias com precipitação diária extrema estão aumentando, principalmente na região sul e, além disso, houve aumento nos números de dias consecutivos sem precipitação no estado. De acordo com os pesquisadores isso indica um prolongamento da estação seca e, conseqüentemente, má distribuição da chuva no decorrer do ano.

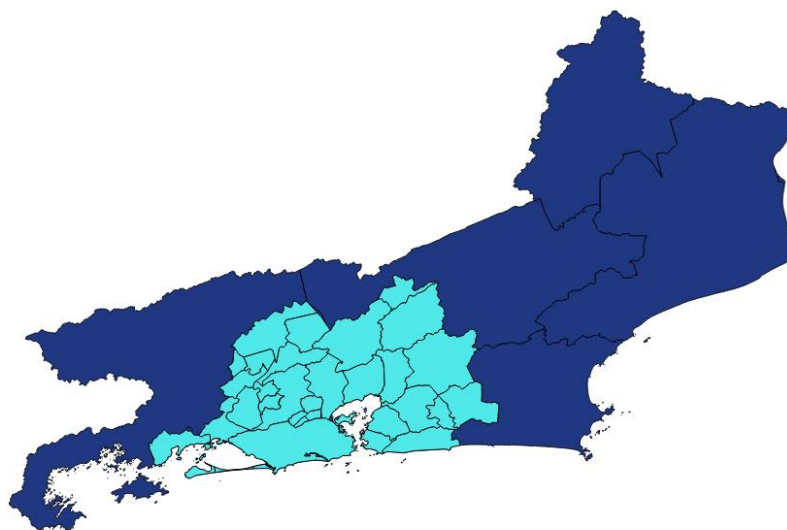
3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste Capítulo são apresentados a área foco do estudo, uma breve descrição dos dados de precipitação utilizados para as análises de tendência e dos dados utilizados para análise dos padrões atmosféricos. Também são explicadas as funções estatísticas utilizadas e a metodologia aplicada no desenvolvimento do estudo.

3.1 Área de estudo

A região a ser estudada é a Mesorregião Metropolitana do Rio de Janeiro (MMRJ) (Figura 3.1), região localizada na região sudeste do Brasil, entre 22,4° e 23,1°S/42,5° e 43,9°O, compreendendo 30 cidades.

Figura 3.1 – Mesorregião Metropolitana do Rio de Janeiro (MMRJ).

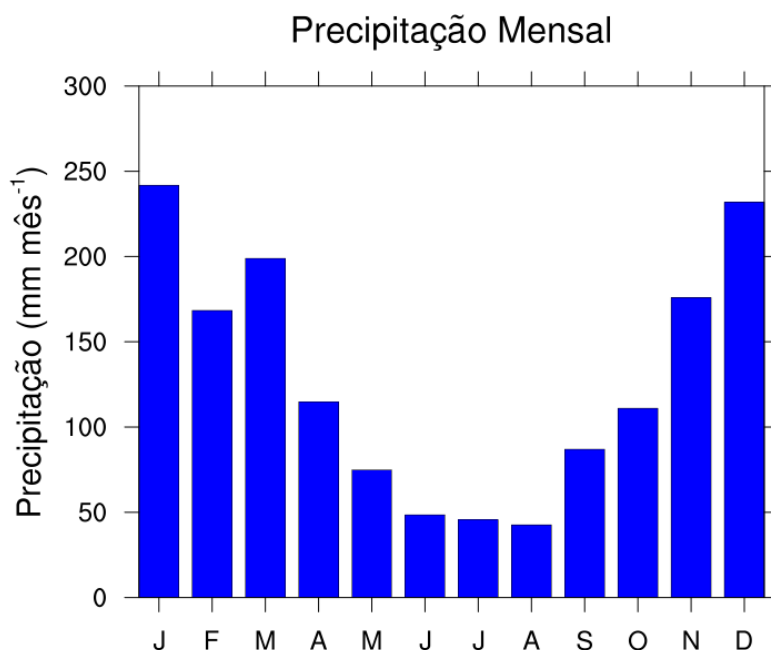


3.2 Período de estudo

O período chuvoso da região foi definido a partir da média mensal de precipitação (Figura 3.2), sendo definido como limiar para considerar um mês chuvoso, valores superiores a 100 mm/mês. A partir desse limiar, definiu-se o período chuvosos entre Outubro e Abril.

Considerando o mínimo de 30 anos para estudos climatológicos, definiu-se o período de outubro de 1985 a abril de 2019 para análise, considerando também a disponibilidade dos dados de precipitação.

Figura 3.2 – Precipitação média mensal na MMRJ, a partir dos dados do CHIRPS.



3.3 Dados

Para as análises deste trabalho foram utilizados dados do projeto *Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Stations* (CHIRPS) (FUNK et al., 2015), que é um conjunto de dados de precipitação quase global, compreendendo as latitudes entre 50°N e 50°S e toda a longitude do globo. As séries temporais, em pontos de grade, estão disponíveis desde 1981 até os dias atuais.

A precipitação acumulada diária, foi calculada para a realização do estudo, no período de outubro de 1985 a abril de 2020 na MMRJ, uma vez que o período chuvoso nessa região fica compreendido entre outubro e abril (Figura 3.2), com maiores acumulados sazonais no verão e no outono (DERECZYNSKI et al., 2009; PRISTO et al., 2018).

O CHIRPS consiste em uma série de dados diários de precipitação, que são obtidos a partir da integração de cinco tipos de dados:

- a) acumulado mensal climatológico de precipitação, denominado CHPClim;
- b) observações do canal infravermelho de dois satélites geoestacionários da NOAA: IR do Climate Prediction Center (CPC) e o B1 IR do National Climate Data Center (NCDC);
- c) observações de precipitação medidas no local (in-situ);
- d) campo de chuva do modelo CFSv2;
- e) precipitação estimada pelo Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM), sendo que esses dados são disponibilizados a partir de 1998.

A assimilação dos dados de estação pelo CHIRPS possui um algoritmo para minimizar a influência exercida pelos os falsos zeros, sendo que os valores para cada ponto de grade foram obtidos a partir da consideração das cinco estações mais próximas, com o peso determinado pela distância entre o ponto e a observação.

O CHIRPS foi definido como dado principal para a realização do estudo, uma vez que as estações pluviométricas não apresentam distribuição homogênea, além de eventualmente apresentarem dados faltantes nas estações, sendo, portanto, uma fonte que demonstra um melhor panorama da região.

Como forma de avaliar os dados do CHIRPS na região, as médias mensais de precipitação do Sistema Alerta Rio, da Prefeitura do Rio de Janeiro, foram adotadas como fonte de dados pluviométricos observados, no período de 1997 – 2019, no município do Rio de Janeiro.

Como o CHIRPS dispõe apenas dos dados de precipitação, a reanálise ERA-5 (HERSBACH et al., 2018), do *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts* (ECMWF), com resolução temporal de médias diárias e resolução

horizontal de $0,25^\circ$, foi utilizada para observar os principais padrões atmosféricos atuantes no período chuvoso da região.

3.4 Metodologia

As médias mensais de precipitação do CHIRPS foram utilizadas para a caracterização climatológica da região, como observado na Figura 3.2, ao passo que o total pluviométrico diário na área da MMRJ foi utilizado para o estudo de precipitação intensa na região.

Como ressaltado por Dereczynski et al. (2009), não há uma definição única na literatura em relação a um limiar para se determinar eventos de precipitação intensa. Um dos modos de definição dos extremos é a utilização da técnica dos quantis, que é a divisão de uma série de dados em subconjuntos de tamanhos iguais, sendo os mais convencionais: os quartis, que dividem o conjunto em quatro partes iguais; os decis, que divide em dez partes; e os percentis que dividem em cem partes iguais (MARTINS, 2005).

Adotando-se a técnica dos percentis, que informa a probabilidade de ocorrência de um determinado evento, define-se que o p-ésimo percentil de uma amostra é um valor tal que p% dos elementos têm valor menor que ele, e (100-p)% dos elementos têm valores maiores. No presente estudo, o evento é um dado acumulado de precipitação, logo, o acumulado correspondente ao percentil de 95%, determina um valor para o qual 5% dos dados de acumulados de precipitação diária na série são superiores a ele (WILKS, 2011).

Para a determinação dos percentis desejados, seguiu-se o procedimento proposto por Xavier et al. (2002):

- a) Colocar os dados em ordem crescente (excluindo-se os dados com ausência de precipitação);
- b) Colocar os números de ordem para cada um dos dados ($i=1$ até $i=n$);
- c) Determinar o percentil que deseja:

$$P_i = \frac{i}{(n+1)} \quad (3.1)$$

Onde n é o número de dados.

O valor do percentil de 95% para a identificação dos eventos de precipitação intensa, abordado por Pristo et al. (2018) em estudo de chuvas intensas no município do Rio de Janeiro, foi definido por fazer parte do conjunto de índices de indicadores de extremos climáticos do *Expert Team on Climate Change Detection and Indexes* (ETCCDI), como utilizado em muitos estudos no Brasil (HAYLOCK et al., 2006; SALVADOR; SANTOS, 2010; SILVA et al., 2014; REGOTO et al., 2018).

Neste trabalho, para calcular o percentil, foram considerados como eventos de precipitação diária os valores que apresentaram acumulado superior a 1 mm, sendo este valor adotado seguindo a metodologia sugerida por Paz e Collischonn (2011). Os autores justificam a utilização do limiar de 1 mm/dia pelo fato dos algoritmos utilizados para estimativa de precipitação em reanálises dificilmente apresentarem valores de precipitação igual a zero, mesmo que em uma determinada região não tenha ocorrido chuva.

Obtida a reta de tendência de eventos de precipitação intensa, a partir do percentil de 95%, foi utilizado o teste de Mann-Kendall.

3.4.1 Teste de Mann-Kendall

Para avaliação com significância estatística de tendências em estudos de séries climatológicas, um dos testes mais utilizados é o teste de Mann-Kendall.

O teste de Mann-Kendall se trata de um teste não paramétrico, uma vez que considera que os valores são independentes e que a distribuição de probabilidade deve ser a mesma (MANN, 1945; KENDALL, 1975, apud OLIVEIRA, 2014). Ele consiste na comparação de um dado valor da série com os valores restantes, numa ordem sequencial e contando quantas vezes os

valores restantes são maiores que o analisado (BACK, 2001; DERECZYNSKI et al., 2013; OLIVEIRA, 2014).

Seguindo a metodologia de Salmi et al. (2002), o cálculo do teste de Mann-Kendall pode ser realizado da seguinte forma:

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{f=i+1}^n \text{signal}(x_f - x_i) \quad (3.2)$$

sendo S a distribuição estatística seguindo o método utilizado por Gilbert (1987), n é o número de variáveis, x_i e x_f são os valores da série nos anos i e f.

O sinal da série se apresenta da seguinte forma:

$$\text{signal} = \begin{cases} 1, \text{ se } (x_f - x_i) > 0 \\ 0, \text{ se } (x_f - x_i) = 0 \\ -1, \text{ se } (x_f - x_i) < 0 \end{cases}$$

Se a série for grande, torna-se necessário uma aproximação normal, uma vez que a distribuição S tende a normalidade. Assim, utiliza-se a variância da distribuição S, que é dada por:

$$\text{VAR}(S) = \frac{1}{18} [n(n-1)(2n+5) - \sum_{p=1}^q t_p(t_p-1)(2t_p+5)] \quad (3.3)$$

onde q é o número de grupos p com mesmos valores na série, t_p é o número de dados com valores iguais em determinado grupo p.

Utilizando as equações 1 e 2, obtém-se o teste de Mann-Kendall pela equação:

$$MK = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{\text{VAR}(S)}}, \text{ se } S > 0 \\ 0, \text{ se } S = 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{\text{VAR}(S)}}, \text{ se } S < 0 \end{cases} \quad (3.4)$$

Pelo resultado de MK, é possível determinar de forma estatisticamente significativa, a tendência da série temporal. A significância estatística se obtém a partir da análise entre o nível de significância (α) e a probabilidade (p) da tendência do teste. O nível de significância utilizado no teste de Mann-Kendall é de $\alpha = 5\%$. Se $\alpha > p$, a tendência que existe é estatisticamente significativa, ao passo que se $\alpha < p$, não há uma significância estatística na tendência da série e com isso não se rejeita a hipótese nula (FERRARI, 2012).

O teste de Mann-Kendall foi aplicado para o percentil de 95%, retornando a tendência na série temporal entre Outubro de 1985 e Abril de 2019, a partir dos valores de precipitação acima desse percentil, sendo considerada a hipótese nula (H_0), aceita quando $MK_{1-p/2}$, indicando que não há tendência na série e a hipótese (H) onde o valor positivo (negativo) de MK indica que há tendência de crescente (decrecente) na série temporal.

3.4.2 Curvatura de Sen

Para estimar a magnitude da tendência da série obtida a partir do teste de Mann-Kendall, utiliza-se o método da Curvatura de Sen (SEN, 1968; apud FERRARI, 2012).

A Curvatura de Sen é calculada a partir da curvatura entre pares de dados da série temporal. A estimativa de inclinação, que indica se há uma tendência, é obtida pelo cálculo:

$$Sen = \frac{x_j - x_i}{j - i} \quad (3.5)$$

onde Sen é o valor estimado da inclinação e x_i e x_j são dados pertencentes a série temporal x_n .

3.4.3 Análise de tendências

Como descrito no tópico anterior, o teste de Mann-Kendall foi utilizado para determinação estatisticamente significativa da tendência da série temporal de precipitação no período chuvoso da região, indicando uma análise de caráter quantitativo, uma vez que é feita a contagem de dias com precipitação acima do percentil de 95%.

Para análise em relação a intensidade dos eventos de precipitação intensa, foram adotados outros quatro índices sugeridos pelo ETCCDI para estudos de tendências de eventos extremos em séries climatológicas: número de dias com precipitação acima de 30mm (R30mm), máxima precipitação diária (R1xday), máxima precipitação em cinco dias consecutivos (R5xday) e número de dias consecutivos com precipitação superior a 1mm/dia (CWD), sendo aplicado o teste Mann-Kendall para significância estatística da série.

Com a aplicação do teste de Mann-Kendall e a análise dos quatro índices de extremos, torna-se possível compreender o comportamento da precipitação ao longo dos últimos anos e analisar as semelhanças e diferenças em relação a estudos anteriores.

3.4.4 Funções Ortogonais Empíricas

De acordo com Wilks (2011), o método das Funções Ortogonais Empíricas (EOF) é uma técnica da estatística multivariada, sendo muito comum em estudos atmosféricos. Ela permite encontrar relações entre diversas variáveis explicando padrões dominantes de variabilidade de um sistema, tendo como vantagem mostrar como variam as variáveis do sistema conjuntamente. Essa técnica também pode ser denominada de análise de componentes principais (PCA).

A análise de EOF possibilita reduzir um conjunto de dados que possuem muitas variáveis, para um conjunto com um menor número de variáveis, que são combinações lineares dos dados originais, a partir da determinação de um vetor orientado na direção da máxima variação dos dados, a partir do cálculo de

covariância entre as variáveis. Esse autovetor, que surge do cálculo, é denominado de Primeira Componente Principal (CP1). Os demais componentes vão seguindo a ordem maior variabilidade dos dados, respeitando o critério de que as componentes devem ser sempre ortogonais.

O autovalor associado a cada autovetor explica a porcentagem da variância total que determinada componente principal (CP) apresenta. Logo, temos que os autovetores representam processos independentes (explicam diferentes sistemas), ao passo que os autovalores representam a variância dos dados.

Como indicado inicialmente, a EOF está relacionada a variância dos dados. Com isso, a obtenção das componentes principais pode ser feita a partir da matriz de Covariância (S), sendo que elas são responsáveis pela máxima variabilidade conjunta dos dados analisados.

Seguindo os métodos utilizados por Varella (2008) e Hongyu et al. (2016), podemos obter, de maneira resumida, as componentes principais partindo de um conjunto de dados X expresso em uma matriz de ordem n x p:

$$X = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1p} \\ x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2p} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{n1} & x_{n2} & \dots & x_{np} \end{bmatrix}$$

A variância de cada dado (x_p) do conjunto se dá pela média da soma dos quadrados da diferença entre o valor (x) de cada dado e a média dos dados do conjunto (\bar{x}):

$$Var(x_p) = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_{pi} - \bar{x}_p)^2 \quad (3.6)$$

A covariância de cada dado se dá pelo grau de dependência entre os componentes das variáveis:

$$Cov(x_{pk}) = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_{pi} - \bar{x}_p)(x_{ki} - \bar{x}_k) \quad (3.7)$$

A matriz de Covariância (S) se apresenta com a variância dos dados na diagonal principal e as covariâncias nas demais posições da matriz:

$$S = \begin{bmatrix} Var(x_1) & Cov(x_1x_2) & \dots & Cov(x_1x_p) \\ Cov(x_2x_1) & Var(x_2) & \dots & Cov(x_2x_p) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Cov(x_px_1) & Cov(x_px_2) & \dots & Var(x_p) \end{bmatrix}$$

A partir das informações da matriz de Covariância, obtemos os autovalores (λ) e autovetores (\vec{x}_i) da seguinte forma:

$$|S - \lambda_i I| x_i = 0 ; x_i \neq 0 \quad (3.8)$$

onde I é a matriz identidade utilizada para identificar os valores escalares (λ) e para cada autovalor (λ_i) encontrado, há um autovetor (x_i) existente.

Sabendo os autovetores e os autovalores, é possível calcular a variância explicada (VE) de cada autovetor, ou seja, a porcentagem que cada CP explica da variância total do conjunto de dados:

$$VE(\vec{x}_i) = \frac{\lambda_i}{\sum_{i=1}^p \lambda_i} \cdot 100 \quad (3.9)$$

onde \vec{x}_i é o autovetor corresponde ao i-ésimo componente principal e λ_i é o autovalor associado a esse componente.

Como as variáveis podem apresentar diferentes ordens grandezas, se torna conveniente padronizar as variáveis, primeiramente, normalizando as mesmas através da subtração da média da variável e dividindo pelo desvio padrão da mesma:

$$x_{ijN} = \frac{x_{ij} - \bar{x}_j}{\sigma(x_j)} \quad (3.10)$$

onde x_{ijN} é o valor de x_{ij} normalizado e $\sigma(x_j)$ é o desvio padrão da variável.

No presente estudo, foram adotadas as três primeiras EOFs, ou seja, os três primeiros CPs das anomalias das variáveis: altura geopotencial em 500 hPa, magnitude do vento em 850 hPa e em 200 hPa, vorticidade em 200 hPa, divergência em 200 hPa, pressão em superfície e água precipitável integrada na coluna atmosférica, que explicam o padrão sinótico médio de cada uma dessas variáveis no período chuvoso da MMRJ entre outubro de 1985 e abril de 2019 e nos dias com precipitação acima do percentil de 95%.

3.4.5 Estudos de casos

Para exemplificar eventos de precipitação e os impactos em relação a desastres naturais, foram analisados três casos, onde houve ocorrência de precipitação intensa devido aos dois principais sistemas precipitantes da região: ZCAS e Frente Fria.

As análises dos padrões sinóticos foram observadas a partir dos campos sugeridos na literatura. Estudos realizados e notícias de jornais foram utilizados para descrever os impactos sociais, ambientais e econômicos causados por esses eventos.

Foram selecionados para os estudos, casos simbólicos que implicaram em grandes prejuízos e colaboraram para criação de meios de mitigação de eventos de precipitação intensa, sendo eles os eventos de abril de 2010, janeiro de 2011 e janeiro de 2016.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados, as tendências observadas em relação a quantidade e intensidade de eventos de precipitação, os padrões atmosféricos médios do período chuvoso e dos dias com precipitação intensa e as análises dos resultados obtidos, bem como considerações em relação a estudos anteriores que serviram como base para este estudo.

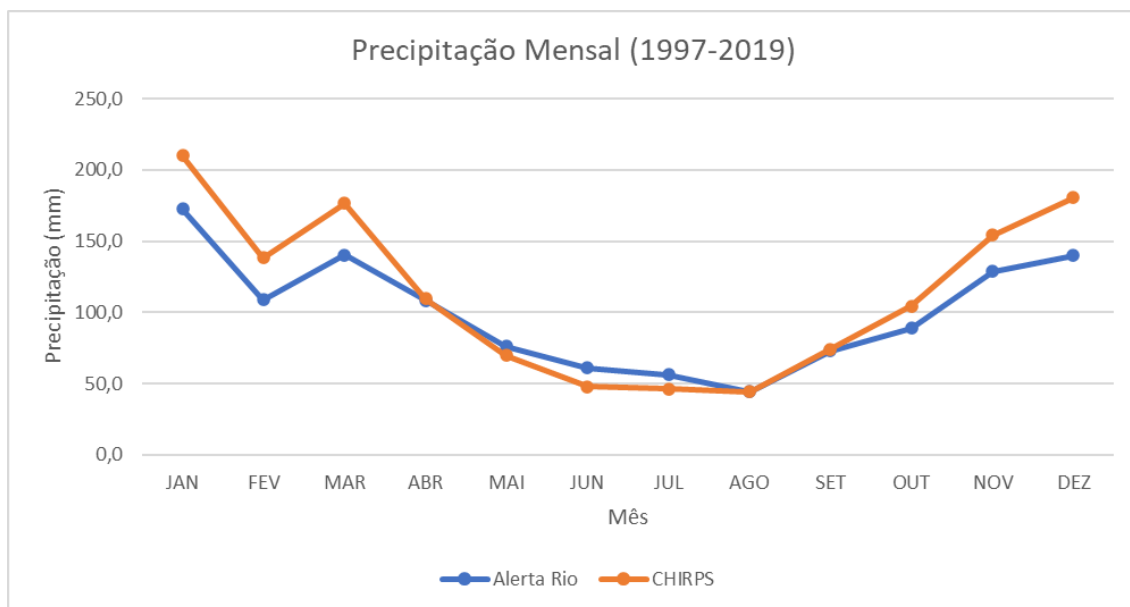
4.1 Série temporal e tendência de eventos de precipitação intensa

A partir das médias mensais de precipitação (Figura 3.2), foram plotadas as médias na área de estudo (as imagens são apresentadas no Apêndice A). Considerou-se o período chuvoso entre outubro e abril, devido ao limiar adotado (precipitação > 100 mm/mês) e a análise foi feita para o período entre outubro de 1985 e abril de 2019.

Estudos recentes, e que motivaram a escolha do tema e da região, indicavam um aumento na tendência de eventos extremos de precipitação, um aumento no número de dias consecutivos sem precipitação e aumento nos acumulados diários, apresentando uma menor distribuição de precipitação ao longo do ano, ou seja, mais dias com chuva intensa e mais dias secos (DERECZYNSKI et al., 2013; PRISTO et al., 2018; SILVA; DERECZYNSKI, 2014; REGOTO et al., 2019).

Com a finalidade de avaliar os dados de precipitação do CHIRPS, comparou-se sua climatologia no período de 1997-2019 com as médias mensais dos pluviômetros do Sistema Alerta Rio, no município do Rio de Janeiro (Figura 4.1).

Figura 4.1 – Comparação das médias mensais de precipitação do CHIRPS e do Sistema Alerta Rio.



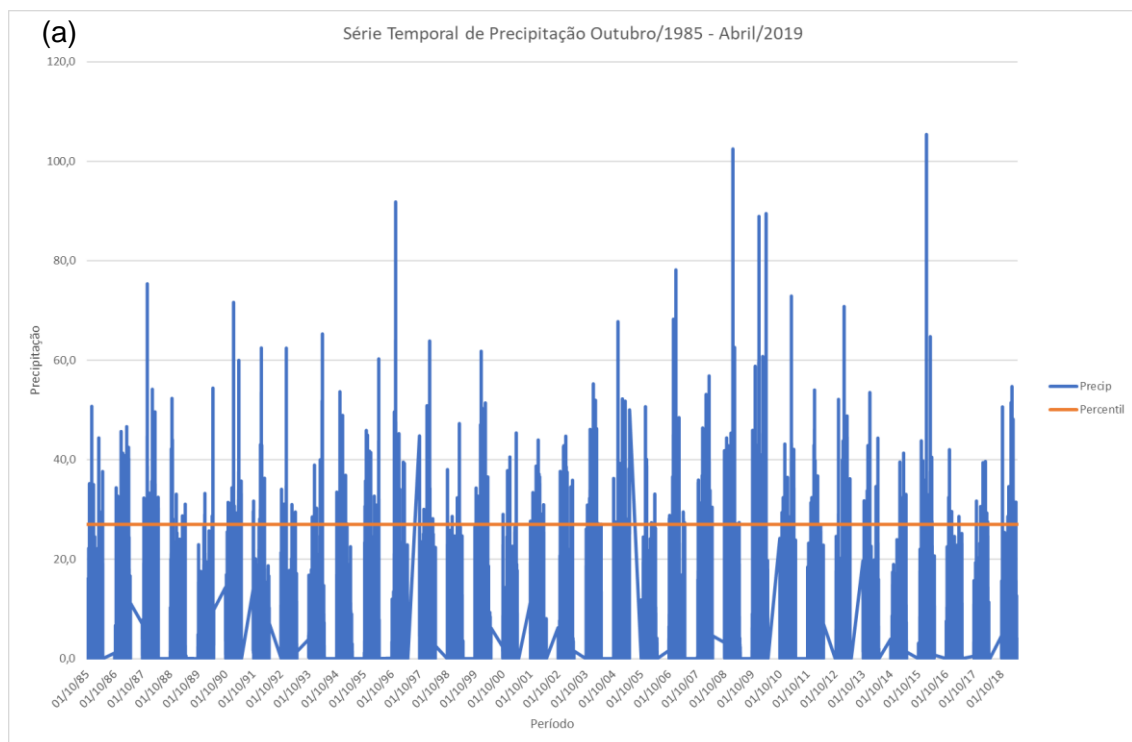
Observou-se que o ciclo anual da precipitação obtido com o CHIRPS se assemelha ao ciclo anual nos dados observados de pluviômetros, com maiores acumulados no verão e menores no inverno, como indicado na literatura. As médias mensais possuem valores bem próximos durante o inverno e uma ligeira diferença no período entre novembro e março, sendo que o CHIRPS superestima a média mensal observada.

Tomando como base o período analisado, utilizando o percentil de 95%, para definição dos eventos de precipitação diária intensa, foi definido o valor do percentil e aplicado o teste de Mann-Kendall para avaliar a tendência dos eventos de precipitação superior a esse limiar na MMRJ, sendo os resultados apresentados nas Figuras 4.2a e 4.2b e na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Precipitação média diária, percentil, teste de Mann-Kendall e Curvatura de Sen.

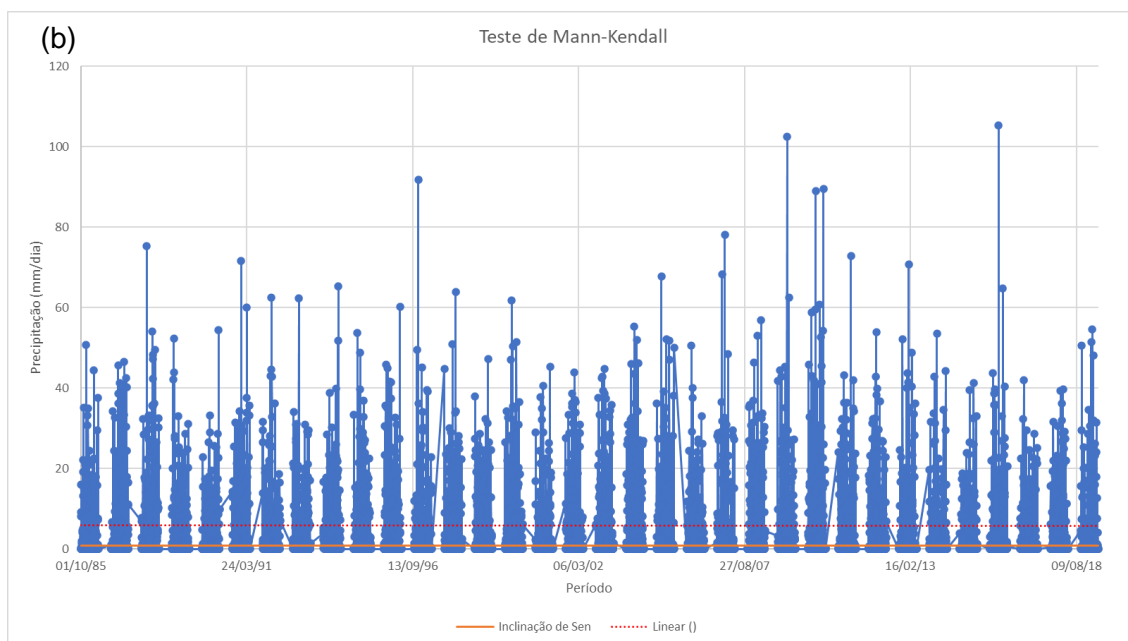
Precipitação Média (mm):	5,9
Percentil 95% (mm):	27,0
S:	-246855,0
Var(S):	39772027455,7
MK:	-0,01
p-valor:	0,216
alfa:	0,05
Inclinação de Sen:	0,0

Figura 4.2 – Série temporal de precipitação diária, em mm, entre outubro de 1985 e abril de 2019.



(Continua)

Figura 4.2 - Conclusão.



Série temporal de precipitação com dados do CHIRPS: percentil de 95% (cor laranja) da série (a) e teste de Mann-Kendall com reta de tendência linear (linha pontilhada) e inclinação de Sen (linha contínua) (b).

Foram observados 361 dias com precipitação superior ao percentil de 95%, sendo, estes dias, a base para a aplicação do teste de Mann-Kendall e para observação dos padrões atmosféricos associados a precipitação intensa.

Analisando o gráfico gerado e a análise estatística descritiva, onde se considerava duas hipóteses: uma hipótese nula (H_0) considerando que não há uma tendência na série e uma hipótese H_a , em que há uma tendência positiva na série temporal, observa-se, conforme apresentado na Tabela 1, que mesmo MK apresentando um valor negativo, ele é bem próximo de zero.

Além disso, o p-valor é maior que o nível de significância (α), indicando que a hipótese nula não pode ser rejeitada, ou seja, se há alguma tendência na série temporal de precipitação, a mesma tem valor muito próximo de zero e não é estatisticamente significativa.

Outra análise que comprova a hipótese nula, indicando que não há uma tendência na série em relação a eventos de precipitação intensa é a inclinação de Sen, onde o valor obtido no cálculo da curvatura foi igual a zero.

Como observado, a análise dos dados de precipitação intensa não apresentou uma tendência estatisticamente significativa, o que vai contra o observado em estudos já realizados no município do Rio de Janeiro (DERECZYNSKI et al., 2013; PRISTO et al., 2018), no estado do Rio de Janeiro (SILVA; DERECZYNSKI, 2014) e em regiões próximas, como no estado do Espírito Santo (REGOTO et al., 2018).

Essa não comprovação em relação a estudos anteriores, pode estar relacionada aos dados utilizados, uma vez que nos estudos abordados, os dados eram observados de estações e pluviômetros e no presente estudo foi utilizado o dado do CHIRPS.

A utilização de um dado semelhante a reanálise permite uma melhor visualização da região como um todo, por possuir uma boa resolução espacial e não apresentar falhas que comumente são apresentadas em observações de dados de estação.

Porém, deve-se levar em consideração, também, que a precipitação se trata de uma variável aleatória e discreta (GUIMARÃES, 2015; MELLO; OLIVEIRA, 2016), por possuir um número finito (acumulado de precipitação) e uma distribuição espacial que não é homogênea e pode apresentar grande variação em áreas próximas.

4.2 Análise dos índices de extremos

Uma vez que numa análise quantitativa da tendência de frequência da precipitação intensa os resultados não se apresentaram de forma significativa, indicando que não há um aumento no número de eventos, procurou-se abordar uma análise em relação a intensidade dos eventos, considerando para tanto os quatro índices do ETCCDI apresentados no Capítulo 3: número de dias com

precipitação superior a um limiar, sendo definido esse limiar em 30mm (R30mm; PRISTO et al., 2018); máxima precipitação diária (Rx1day); máxima precipitação em cinco dias consecutivos (Rx5day); e dias consecutivos com precipitação, considerando os dias com precipitação superiores a 1mm (CWD).

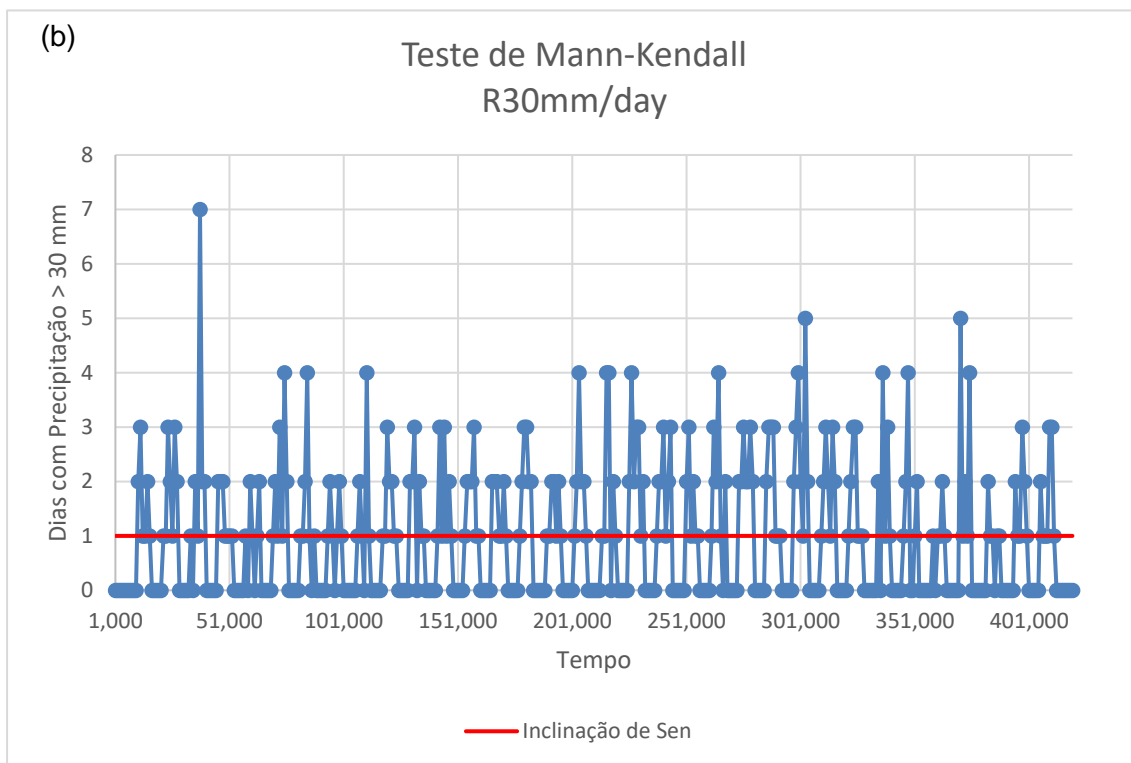
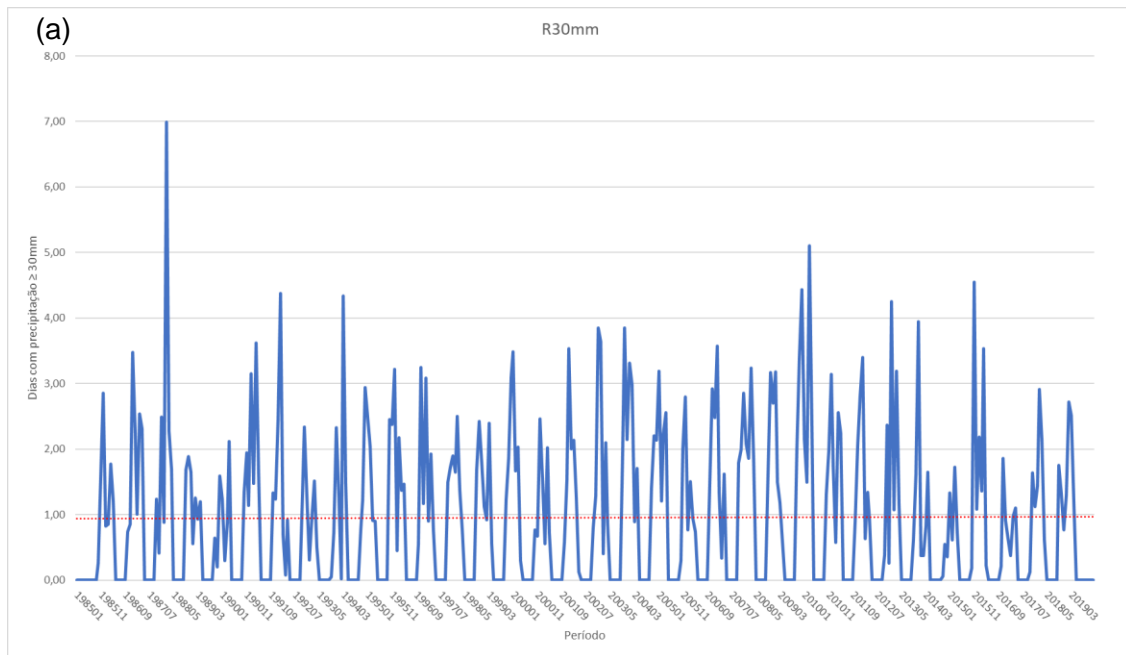
No gráfico do índice R30mm (Figura 4.3a), o mês com o maior número de dias com precipitação acima de 30mm é fevereiro de 1987, mas mesmo o maior valor se apresentando no período inicial da análise, é possível observar uma tendência positiva na série temporal, indicando um aumento no número de dias com precipitação superiores a 30mm ao longo da série, principalmente nos últimos 10 anos, como se observa na equação da reta de tendência: $y = 0,0001x + 0,9442$.

A tendência positiva é estatisticamente significativa pelo teste de Mann-Kendall (Figura 4.2b), onde observou-se o p-valor inferior ao nível de significância (Tabela 4.2), rejeitando a hipótese nula.

Tabela 4.2 – Teste de Mann-Kendall e Curvatura de Sen para o índice R30mm.

Tau de Kendall	0,002
S	176,000
Var(S)	7127171,333
p-valor (bilateral)	0,947
alfa	0,950

Figura 4.3 – Tendência de eventos com precipitação diária superior a 30 mm.



Ao analisar a figura do índice Rx1day (Figura 4.4a) e a equação da reta, dada por: $y = 0,02x + 25,76$, nota-se uma leve tendência positiva na série, indicando que os acumulados de precipitação em um único dia estão ficando maiores, ou seja, mais precipitação em 24h. O que se observa, também, nos dados de

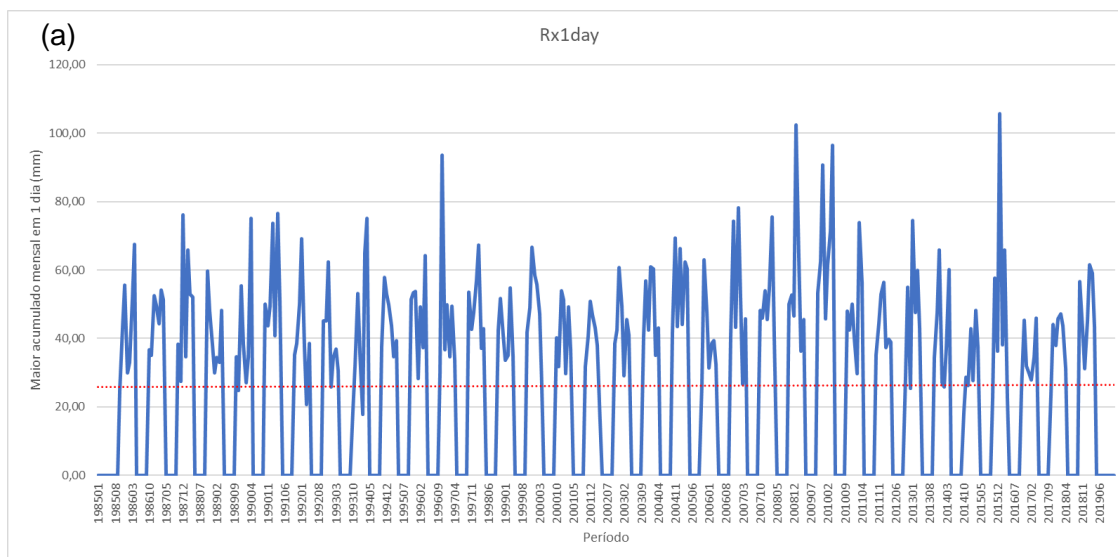
precipitação, onde os maiores acumulados diários se apresentam no intervalo dos últimos 10 anos, com destaque para os meses de janeiro e dezembro de 2009, abril de 2010 e janeiro de 2016.

Por outro lado, o teste de Mann-Kendall (Figura 4.4b) apresenta um p-valor maior que o nível de significância (Tabela 4.3), indicando que a hipótese nula, onde não há tendência, não pode ser rejeitada e conseqüentemente, a tendência de máxima precipitação em um único dia não pode ser estatisticamente significativa.

Tabela 4.3 – Teste de Mann-Kendall e Curvatura de Sen para o índice Rx1day.

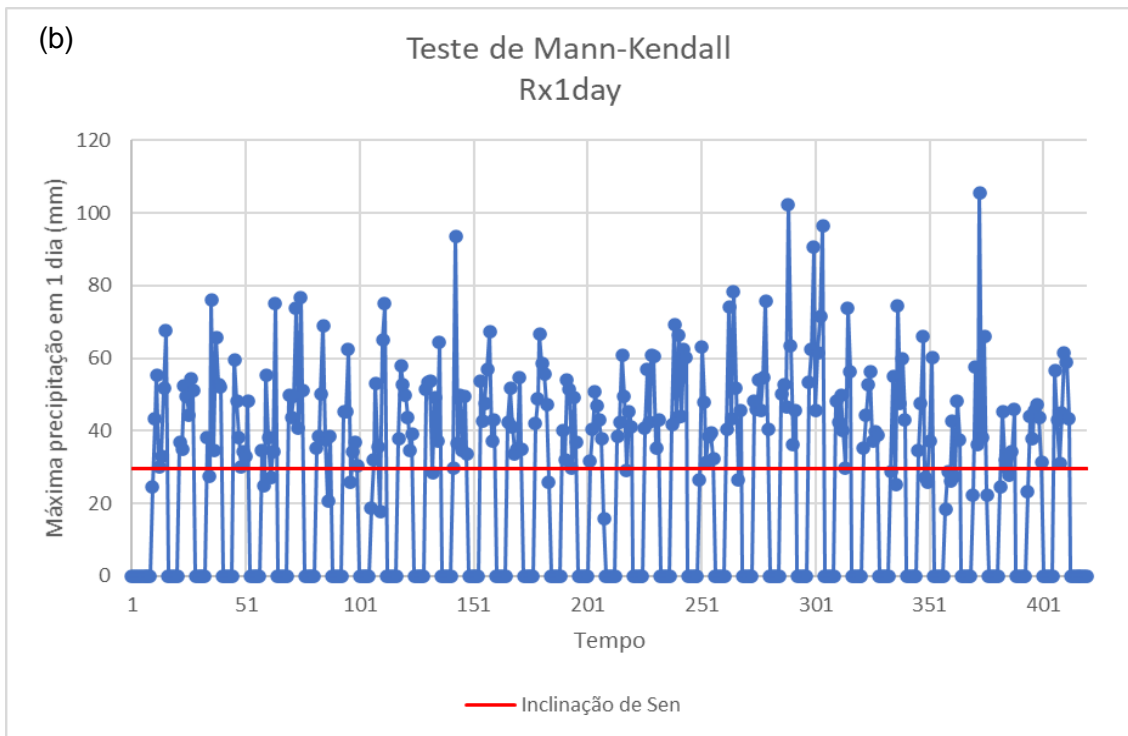
Tau de Kendall	0,002
S	124,000
Var(S)	7585967,333
p-valor (bilateral)	0,964
alfa	0,950

Figura 4.4 – Tendência de máximos acumulados diários de precipitação.



(Continua)

Figura 4.4 – Conclusão.

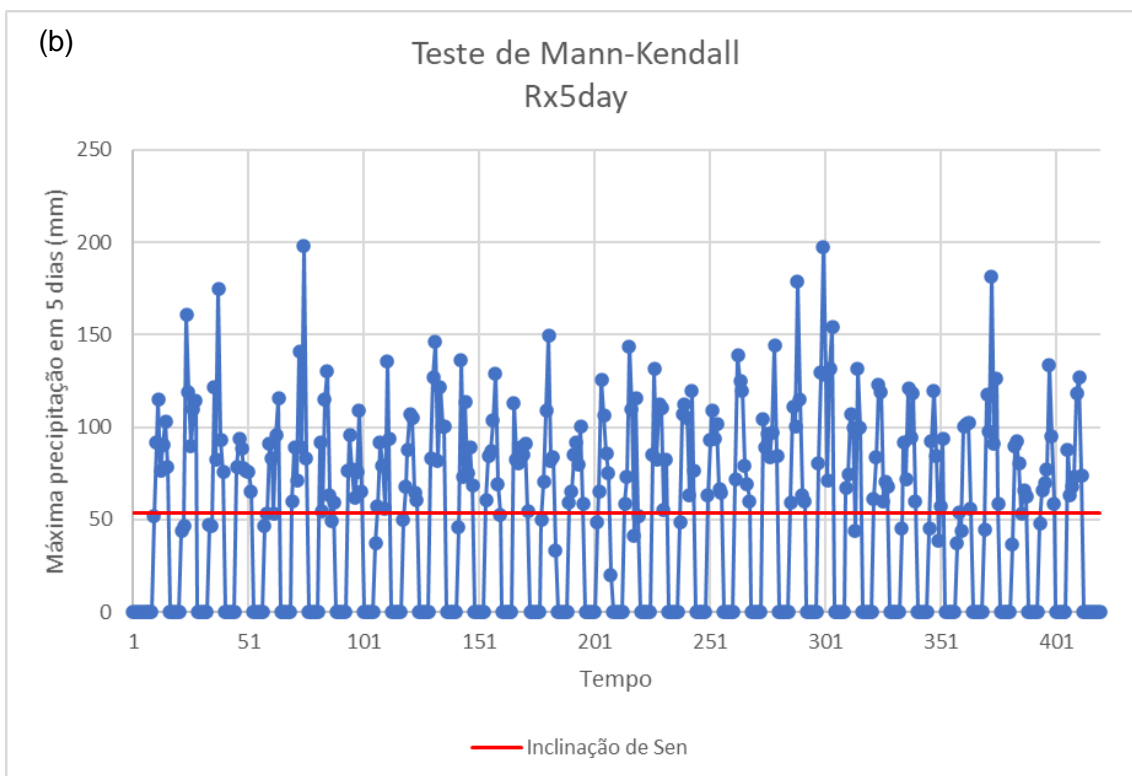
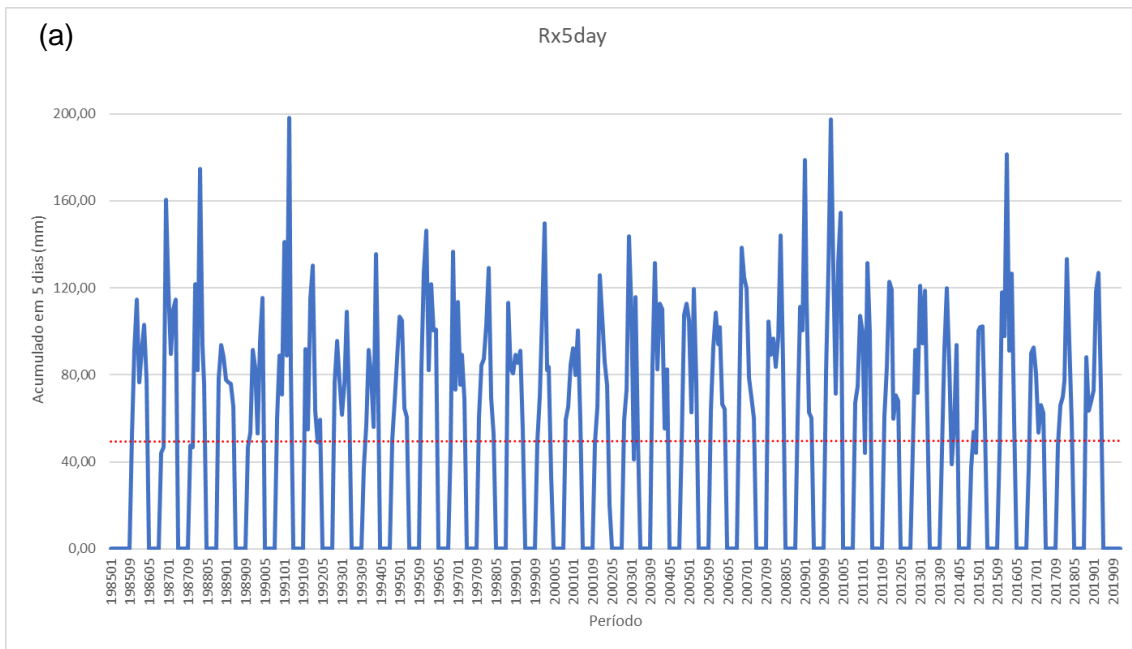


Em relação ao índice Rx5day (Figura 4.5a), também se observa uma tendência positiva na série temporal, cuja equação da reta de tendência se dá por: $y = 0,012x + 49,25$, indicando que os acumulados em cinco dias consecutivos também estão maiores nos últimos anos. O teste de Mann-Kendall (Figura 4.5b), confirma a tendência estatisticamente significativa, com o p-valor inferior ao nível de significância (Tabela 4.4).

Tabela 4.4 – Teste de Mann-Kendall e Curvatura de Sen para o índice Rx5day.

Tau de Kendall	0,003
S	214,000
Var(S)	7585969,333
p-valor (bilateral)	0,938
alfa	0,950

Figura 4.5 – Tendência de máximo de precipitação em cinco dias consecutivos.



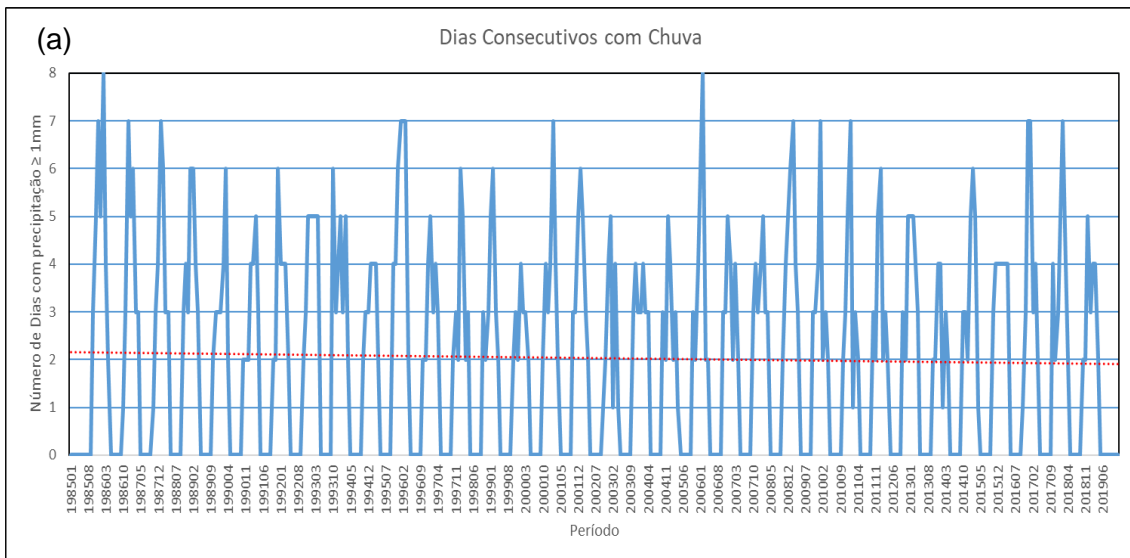
Ao contrário dos três índices anteriores, o índice CWD (Figura 4.6a) apresenta uma tendência negativa, com a equação dada por $y = -0,001x + 2,16$, ou seja, os números de dias consecutivos com precipitação, considerando a precipitação a partir de 1mm, vêm apresentando uma diminuição ao longo dos últimos anos.

O teste de Mann-Kendall (Figura 4.6b) indica que há uma tendência na série, uma vez que o p-valor é inferior nível de significância e a tendência é negativa, uma vez que o valor do Tau de Kendall é negativo (Tabela 4.5).

Tabela 4.5 – Teste de Mann-Kendall e Curvatura de Sen para o índice CWD.

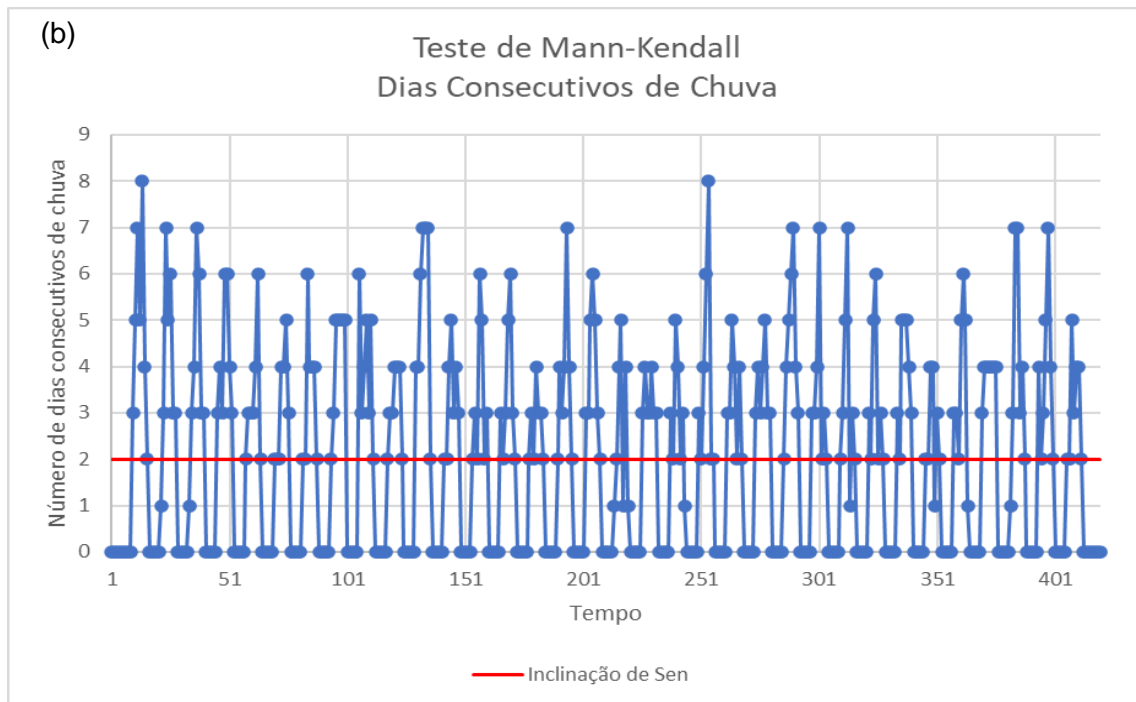
Tau de Kendall	-0,018
S	-1340,000
Var(S)	7519402,000
p-valor (bilateral)	0,625
alfa	0,950

Figura 4.6 – Tendência de dias consecutivos com precipitação superior a 1mm.



(Continua)

Figura 4.6 – Conclusão.



Mesmo que a Curvatura de Sen tenha valores nulos em todos os índices, a indicação de uma tendência a partir do p-valor e do Tau de Kendall, vão de encontro com estudos anteriores para a região, indicando uma diminuição nos dias com precipitação, ou seja, aumento de dias sem precipitação.

Isso indica uma pior distribuição da precipitação e consequente aumento dos índices de precipitação acumulada em um menor espaço de tempo, o que possibilita afirmar que, por mais que não se apresente uma tendência significativa em relação a quantidade de eventos de precipitação intensa, há um aumento na intensidade desses eventos.

Esse aumento na intensidade de eventos de precipitação intensa, impacta diretamente na sociedade, uma vez que grande parte dos desastres naturais na região são provocados pela precipitação (MARENGO et al., 2020). Dessa forma, aumenta-se o risco de inundações, deslizamentos e proliferação de doenças por água contaminada, em virtude da região de estudo ser uma área suscetível à ocorrência de desastres devido à sua grande vulnerabilidade.

4.3 Análise dos padrões atmosféricos por meio de EOF

Com a finalidade de analisar os padrões atmosféricos médios do período de estudo, foi adotado a técnica de análise de componentes principais.

Seguindo a descrição apresentada no Capítulo 3, foram analisados os padrões a partir dos dados de médias diárias da reanálise Era-5, do ECMWF. Com esses dados foram feitas as médias mensais de cada variável utilizada para análise, sendo obtidas, em seguida, as anomalias de cada variável e aplicada a análise de EOF, sendo obtidos os campos médios das três primeiras componentes principais de cada variável (autovetores) e suas respectivas variâncias explicadas (autovalores), representadas em porcentagem.

Além do padrão atmosférico médio do período, foram observadas as três primeiras componentes dos padrões médios dos dias com precipitação superior ao percentil de 95%, com intuito de verificar possíveis explicações para a ocorrência de eventos de precipitação intensa.

Analisando os padrões médios do período de estudo, no campo de altura geopotencial em 500 hPa, as três primeiras EOFs correspondem a 77% da variância explicada dessa variável. Já no campo de vorticidade em 200 hPa, as três primeiras EOFs representam 38,24% da variância no período. As três primeiras EOFs da magnitude do vento em 850 hPa explicam 56,83% da variância e da magnitude em 200 hPa explicam 54,01%. As três primeiras EOFs do campo de divergência representam 13,03% da variância, enquanto as três primeiras componentes principais do campo de água precipitável integrada na coluna somam 20,93% da variância explicadas.

Nos padrões médios dos dias com precipitação superior ao percentil de 95%, as três primeiras EOFs do campo de altura geopotencial em 500 hPa, representam 63,76% da variância. As magnitudes do vento em 850 hPa e em 200 hPa têm, respectivamente, 37,24% e 38,07% dos padrões explicados pelas três primeiras componentes principais. O campo de pressão em superfície tem 60,33% de sua variância, explicada pelas três primeiras EOFs. E os campos de água precipitável

e divergência em 200 hPa, têm, em suas três primeiras componentes principais, 12,96% e 4,84% da variância explicada, respectivamente.

As observações e análises de cada uma das três EOFs dos campos descritos são apresentadas a seguir.

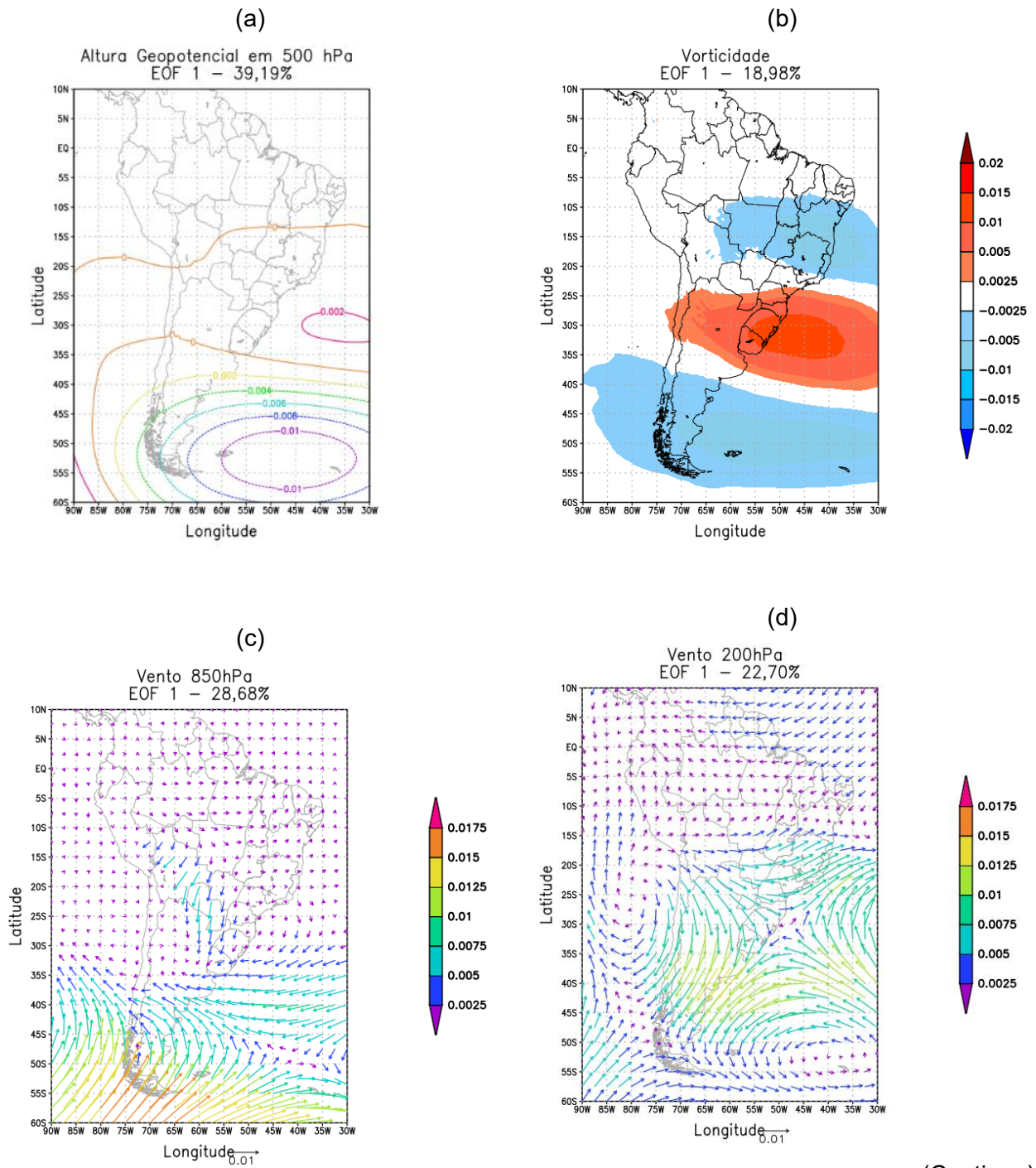
4.3.1 Primeira Componente Principal

Nas figuras 4.7 e 4.8 são apresentados os padrões respectivos a primeira EOF de cada uma das variáveis, nos padrões médios do período e nos padrões médios dos eventos de precipitação intensa.

A primeira componente principal (CP1) do campo de altura geopotencial em 500 hPa (4.7a), representa 39,19% da variância. Observa-se um padrão com aumento da altura geopotencial no oceano atlântico próximo a costa da região Sul do Brasil, o que caracteriza a influência do sistema de alta pressão sobre o oceano, provavelmente relacionada a Alta Subtropical do Atlântico Sul (ASAS), que normalmente se encontra deslocada mais ao sul durante o período do verão (ESCOBAR, 2014), que coincide com o período chuvoso da MMRJ.

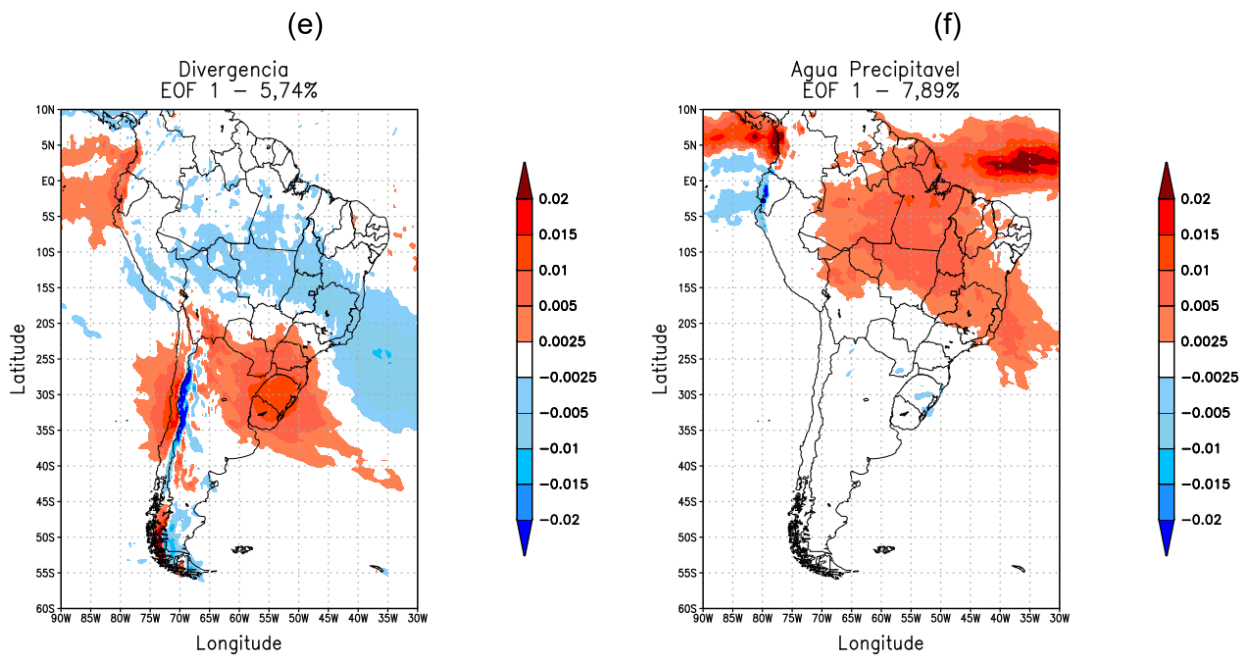
No campo de vorticidade em 200 hPa (4.7b), a CP1 diz respeito a 18,98% da variância e indica uma vorticidade positiva sobre a mesma região onde há um aumento da altura geopotencial, ou seja, uma vorticidade anticiclônica. A norte da vorticidade positiva, há um centro de vorticidade negativa, indicando um padrão ciclônico na latitude próxima a costa da região Sudeste e sul do Nordeste.

Figura 4.7 – Primeira Componente Principal.



(Continua)

Figura 4.7 – Conclusão.



CP1 dos campos atmosféricos médios do período de estudo: (a) altura geopotencial em 500 hPa, (b) vorticidade em 200 hPa, (c) magnitude do vento em 850 hPa, (d) magnitude do vento em 200hPa, (e) divergência em 200 hPa e (f) água precipitável integrada na coluna atmosférica.

Os padrões de vorticidade apresentados são comprovados no campo de vento em 200 hPa (4.7d), onde o escoamento no sentido anti-horário coincide com a região da vorticidade positiva e o escoamento com sentido horário coincide com a vorticidade negativa. Este campo representa 22,7% da variância explicada do vento em 200 hPa.

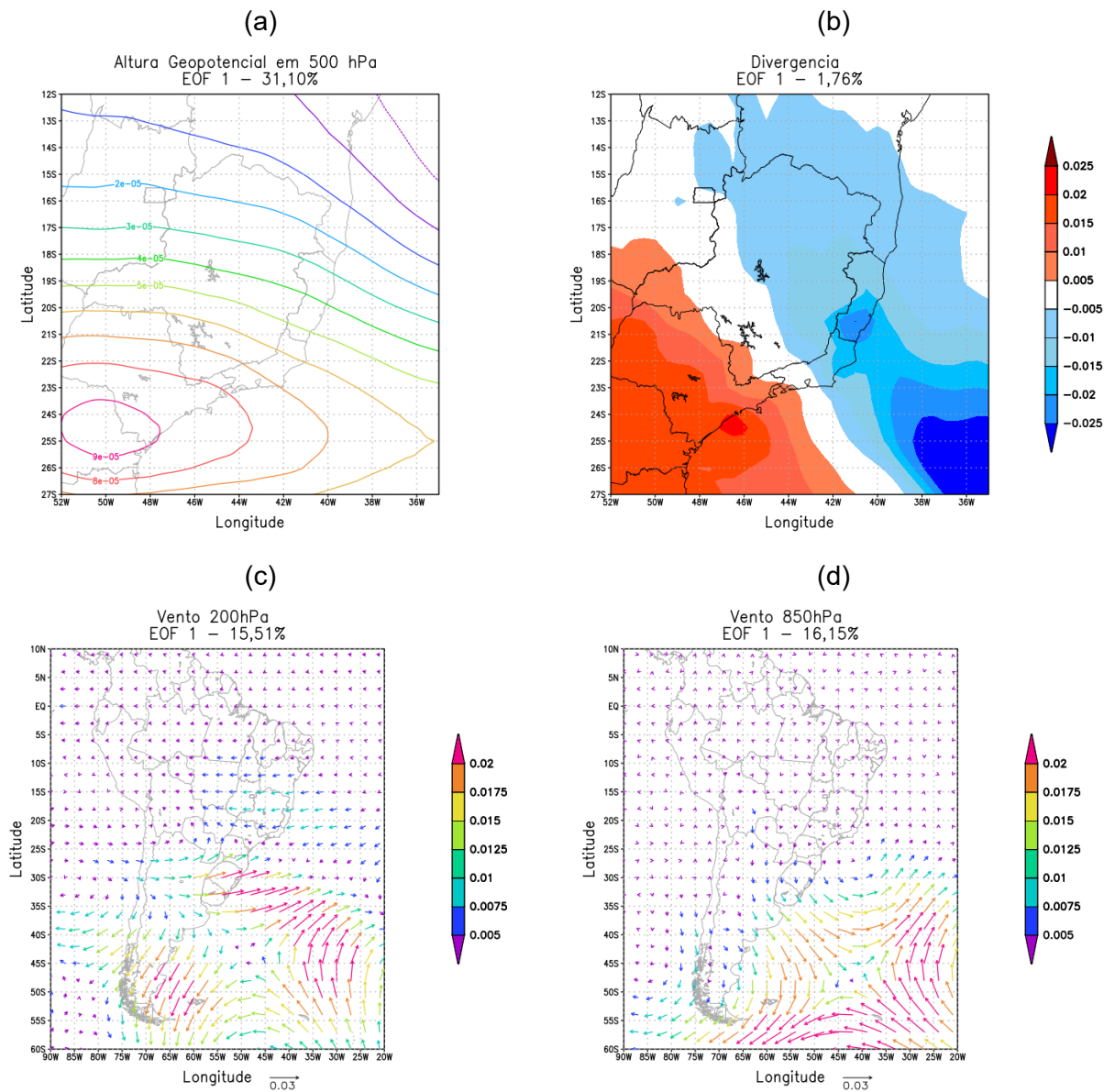
A primeira EOF do campo de vento em 850 hPa (4.7c) reflete 28,68% da variável. Neste campo é possível notar um escoamento com direção NO-SE da região Norte para o Centro-Oeste e Sudeste do Brasil, terminando em um escoamento ciclônico no litoral das regiões Sul e Sudeste.

As primeiras EOFs dos campos de divergência em 200 hPa (4.7e) e água precipitável (4.7f), correspondem a 5,74% e 7,89% da variância explicada de cada uma das variáveis. Os dois campos se complementam, indicando uma divergência em altitude e conseqüente convergência em superfície e maior quantidade de água precipitável disponível pelo centro-norte do país, incluindo a

região que abrange o escoamento NO-SE, podendo caracterizar uma influência do regime de ZCAS, que vai de encontro com a literatura, onde se indica esse sistema como o principal sistema precipitante no período do verão.

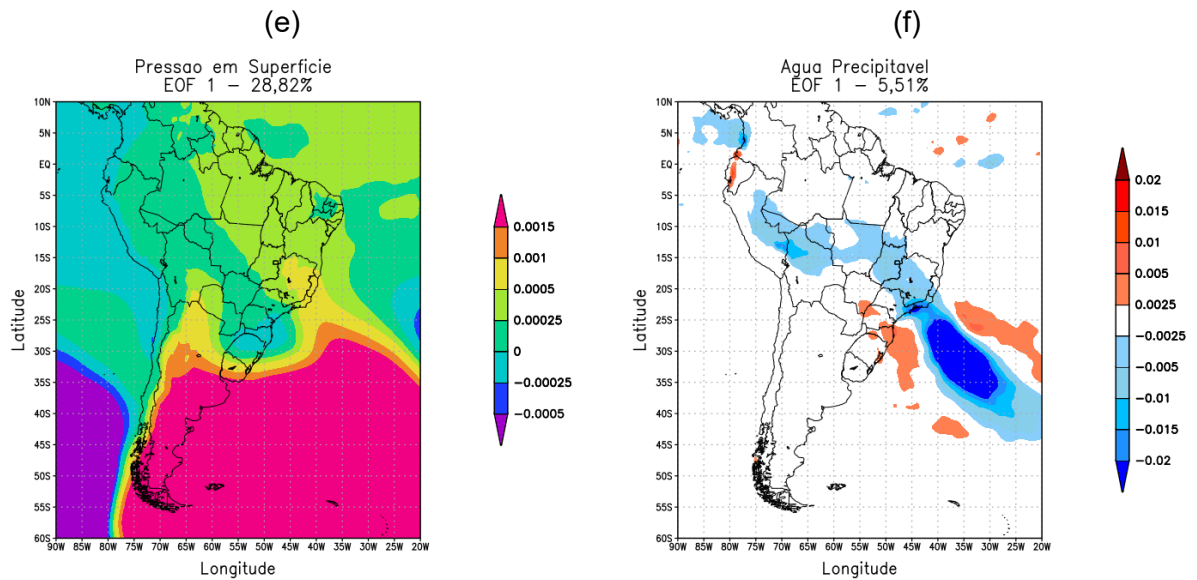
Analisando os padrões referentes aos dias com precipitação superior ao percentil de 95% (Figura 4.8), têm-se que o campo de altura geopotencial (4.8a) possui 31,10% de sua variância, explicada pela primeira EOF, onde, focando na região de interesse observa-se uma leve curvatura, indicando a possibilidade de presença de um cavado em médios níveis.

Figura 4.8 – Primeira Componente Principal.



(Continua)

Figura 4.8 – Conclusão.



CP1 dos campos atmosféricos médios dos dias de precipitação intensa: (a) altura geopotencial em 500 hPa, (b) divergência em 200 hPa, (c) magnitude do vento em 200 hPa, (d) magnitude do vento em 850 hPa, (e) pressão em superfície e (f) água precipitável integrada na coluna atmosférica.

O campo de divergência (4.8b) apresenta uma baixa variância, indicando que a respectiva variável possui alta variabilidade e não exerce uma grande influência nos padrões de eventos de precipitação intensa. Em sua primeira EOF, que explica apenas 1,76% da variância, nota-se que a região fica em um ponto de transição entre convergência e divergência em altos níveis.

Os padrões de magnitude do vento em 850 hPa (4.8d) e 200 hPa (4.8c), possuem variâncias explicadas de 16,15% e 15,51%, respectivamente, em suas primeiras EOFs. O campo em 200 hPa apresenta um escoamento de leste, ao passo que o escoamento em 850 hPa sugere um centro de circulação anticiclônica sobre a região sudeste.

No campo de pressão em superfície (4.8e), onde a primeira componente principal explica 28,82% da variável, nota-se um padrão semelhante a um cavado na região da costa do sudeste. Em concordância com esse padrão, a

maior anomalia no conteúdo de água precipitável (4.8f) se encontra sobre a mesma região, com 5,51% da variância explicada.

4.3.2 Segunda Componente Principal

Os padrões referentes a segunda componente principal são apresentados nas figuras 4.9 e 4.10.

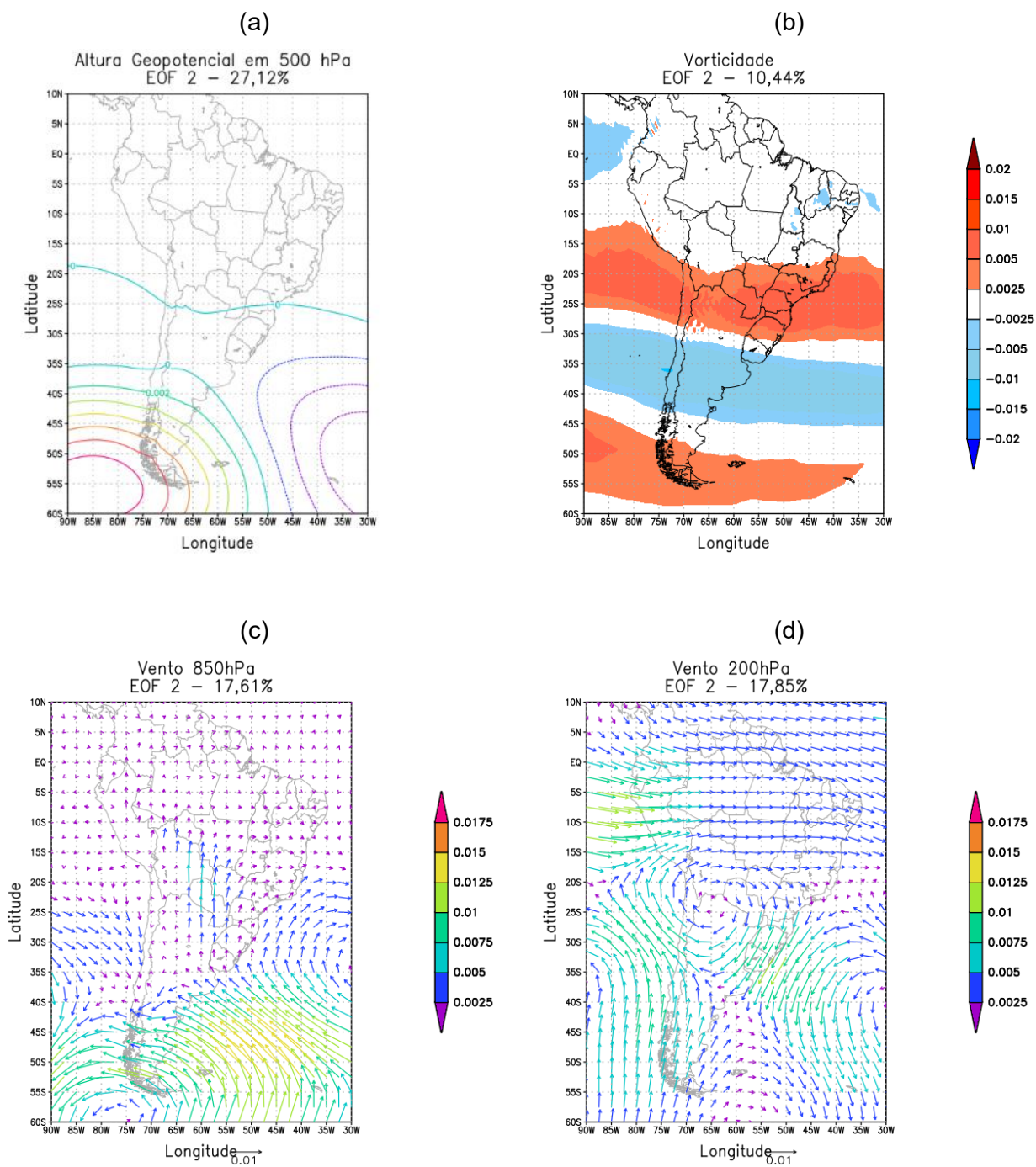
Na segunda componente principal do campo de altura geopotencial em 500 hPa (4.9a), que corresponde a 27,12% da variância, é possível observar um padrão semelhante a um cavado em médios níveis, a sudeste da região Sul, entre 35° - 45° S e 35° - 45° O.

A segunda EOF do campo de vorticidade (4.9b) explica 10,44% da variável, apresentando uma vorticidade positiva sobre parte do litoral das regiões Sul e Sudeste em contraste com uma vorticidade negativa a sul da região Sul.

O campo de vento em 850 hPa (4.9c) correspondente a CP2, que representa 17,61% da variância, indica um vento de quadrante sul entrando pela região Sul do país com contribuição de um escoamento ciclônico sobre o oceano a sudeste da região Sul.

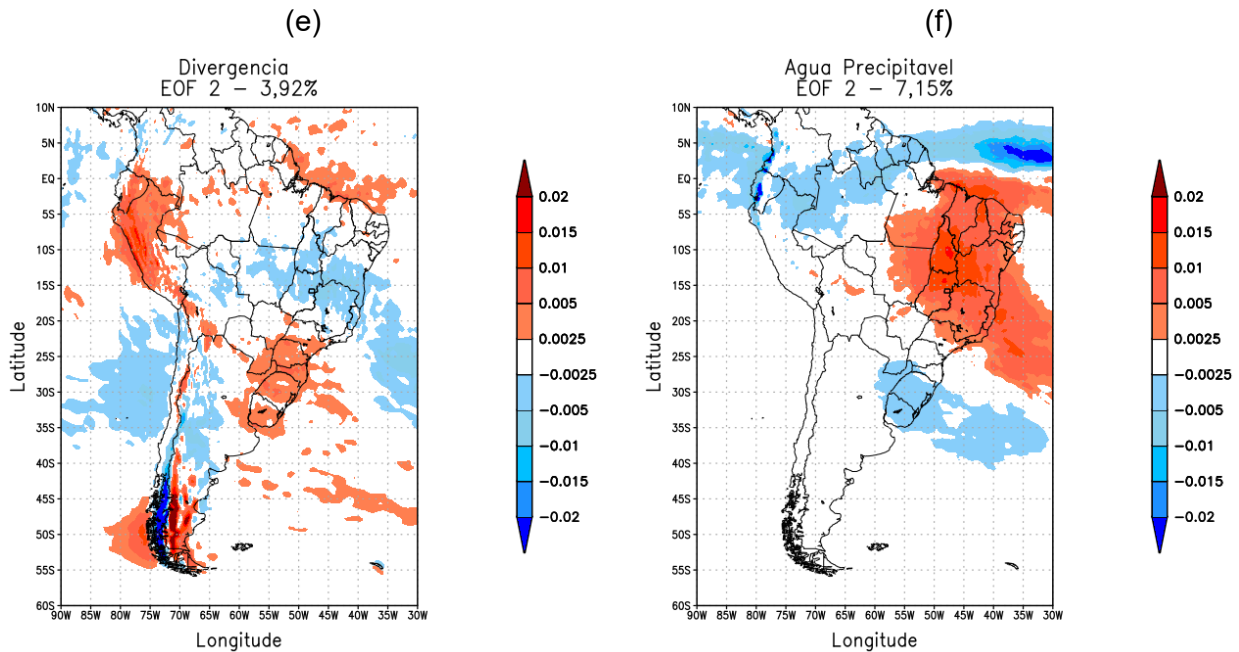
Em 200 hPa, o campo de vento (4.9d), cuja CP2 corresponde a 17,85% da variância, novamente se observa uma circulação anticiclônica próximo a região onde há vorticidade positiva e uma difluência no escoamento na região onde há vorticidade negativa.

Figura 4.9 – Segunda Componente Principal.



(Continua)

Figura 4.9 – Conclusão.



CP2 dos campos atmosféricos médios do período de estudo: (a) altura geopotencial em 500 hPa, (b) vorticidade em 200 hPa, (c) magnitude do vento em 850 hPa, (d) magnitude do vento em 200hPa, (e) divergência em 200 hPa e (f) água precipitável integrada na coluna atmosférica.

Na figura 4.9e, o campo de divergência em 200 hPa, em que a segunda componente principal representa 3,92% da variância, indica um padrão em que o limite entre a divergência (cor verde) e a convergência (amarelo) em altitude ocorre na região de estudo, o que condiz com a circulação apresentada no campo de vento em 200 hPa (4.9d).

O campo de água precipitável integrada na coluna (4.7f), tem uma CP2 que reflete 7,15% da variância explicada. Assim como na CP1, o campo da segunda EOF apresenta uma anomalia positiva de água precipitável sobre o centro-norte do Brasil.

Pela presença de um escoamento de Sul no campo de vento em baixos níveis e a presença de um cavado em médios níveis, semelhante ao cavado pré frontal observado por Escobar (2014), pode-se indicar uma influência de um Sistema Frontal, outro importante sistema precipitante da região e que atua ao longo do

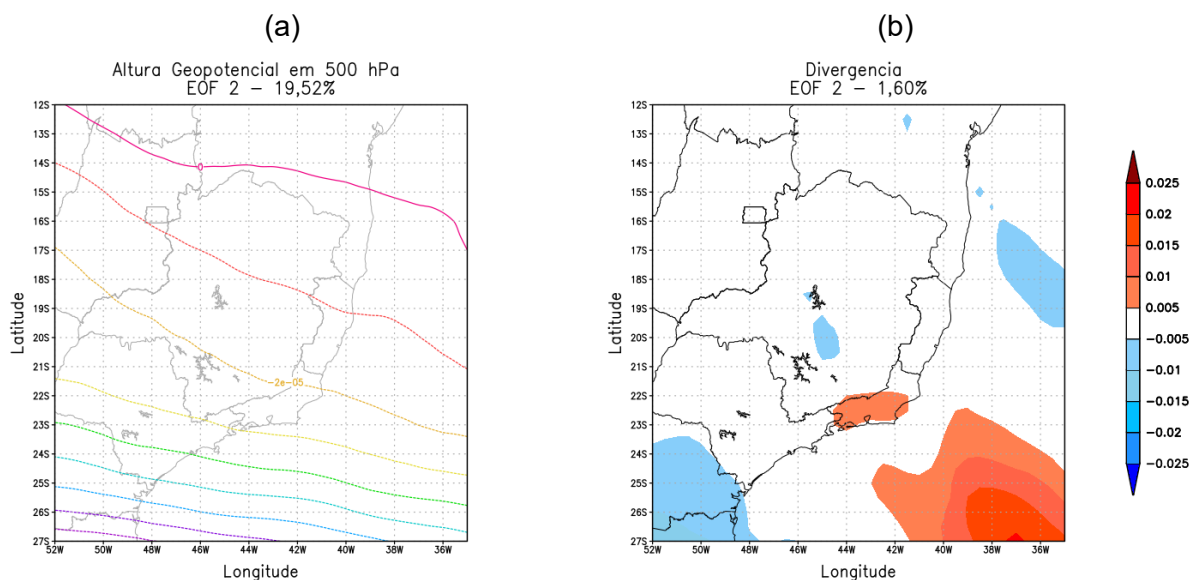
ano de diferentes maneiras na região, seja em relação a passagem de uma Frente Fria com posterior declínio da temperatura, como também auxiliando para a manutenção da ZCAS.

Na segunda componente principal dos campos relativos aos dias de eventos de precipitação intensa (figura 4.10), observa-se que há uma leve ondulação na anomalia de altura geopotencial (4.10a) sobre a região, sendo correspondente a 19,52% da variância explicada.

No campo de divergência em 200 hPa (4.10b), que representa 1,60% da variância, nota-se um padrão de divergência bem local sobre a MMRJ.

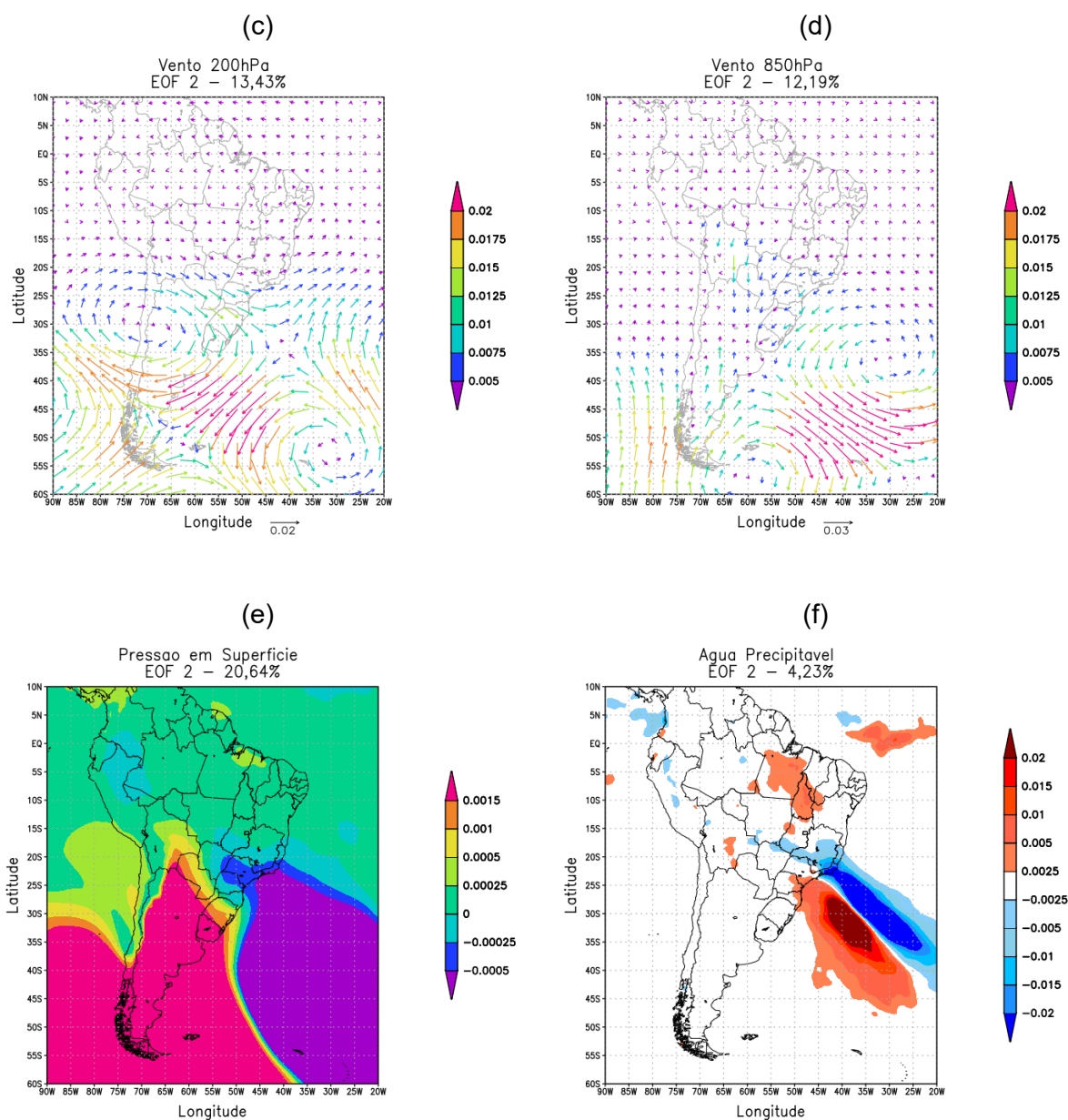
O campo de vento em 850 hPa (4.10d), explica 12,19% da variância e apresenta uma circulação ciclônica no oceano transportando umidade para a costa do Sudeste. O campo médio de vento em 200 hPa (4.10c), que explica 13,43% da variância, indica uma difluência no escoamento em altos níveis sobre o sul da região Sudeste.

Figura 4.10 – Segunda Componente Principal.



(Continua)

Figura 4.10 – Conclusão.



CP2 dos campos atmosféricos médios dos dias de precipitação intensa: (a) altura geopotencial em 500 hPa, (b) divergência em 200 hPa, (c) magnitude do vento em 200 hPa, (d) magnitude do vento em 850 hPa, (e) pressão em superfície e (f) água precipitável integrada na coluna atmosférica.

Assim como na primeira componente principal, a segunda EOF da anomalia de pressão em superfície (4.10e) apresenta uma configuração de um cavado sobre

a região litorânea do Sudeste, coincidindo com o campo de água precipitável (4.10f), onde a componente principal explica 4,23% da variância.

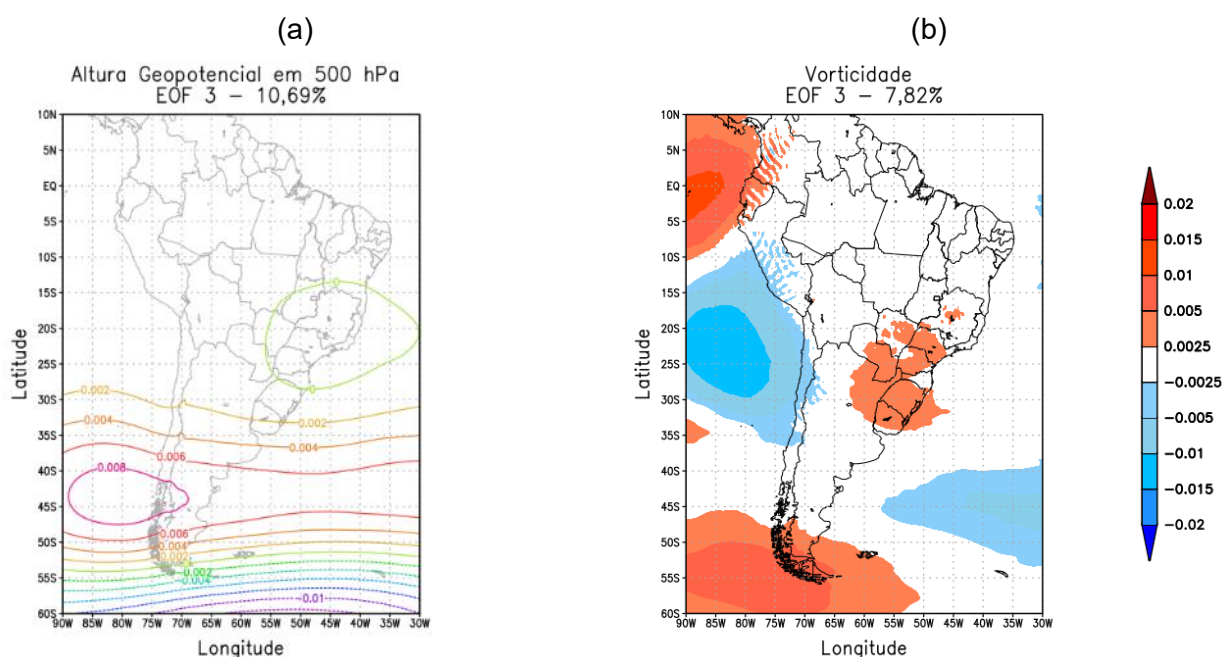
4.3.3 Terceira Componente Principal

As figuras 4.11 e 4.12 apresentam as terceiras componentes principais dos padrões atmosféricos analisados, ou seja, a terceira variância que mais explica os padrões durante o período chuvoso da região.

A terceira componente principal do campo de altura geopotencial em 500 hPa (4.11a), que corresponde a 10,69% da variância, não apresenta anomalia sobre o país, indicando uma situação mais estável em médios níveis sobre a região.

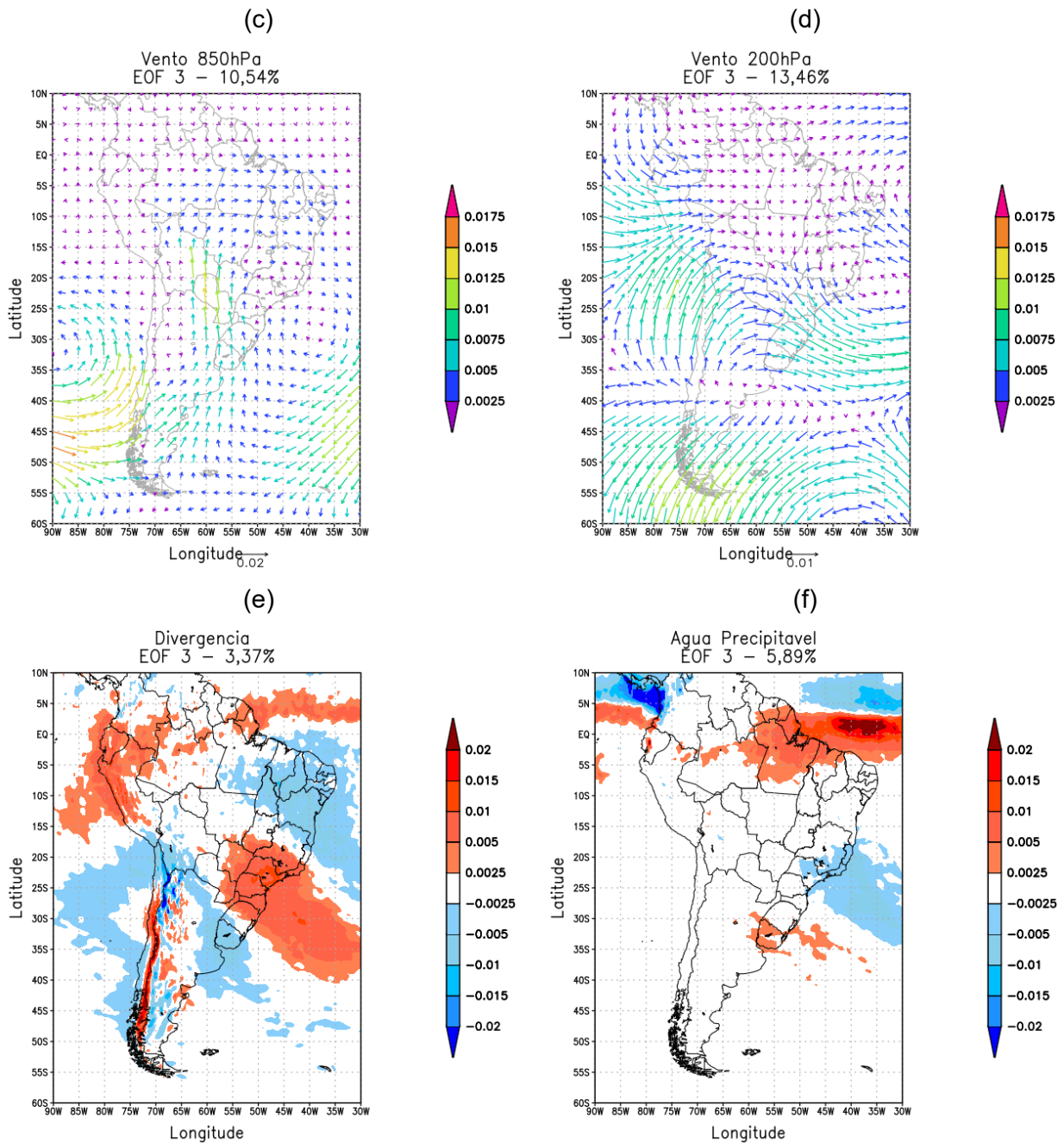
Os campos de vorticidade (4.11b) e divergência (4.11e), que possuem as componentes principais que explicam 7,82% e 3,37%, respectivamente, da terceira maior variância de cada um, condizem com o campo de altura geopotencial. A vorticidade é positiva sobre todo o centro-sul do Brasil e o campo de divergência é convergente em altitude na mesma região.

Figura 4.11 – Terceira Componente Principal.



(Continua)

Figura 4.11 – Conclusão.



CP3 dos campos atmosféricos médios do período de estudo: (a) altura geopotencial em 500 hPa, (b) vorticidade em 200 hPa, (c) magnitude do vento em 850 hPa, (d) magnitude do vento em 200hPa, (e) divergência em 200 hPa e (f) água precipitável integrada na coluna atmosférica.

A CP3 do campo de água precipitável (4.11f), que reflete 5,89% da variância explicada, apresenta um valor de anomalia negativa no conteúdo de água

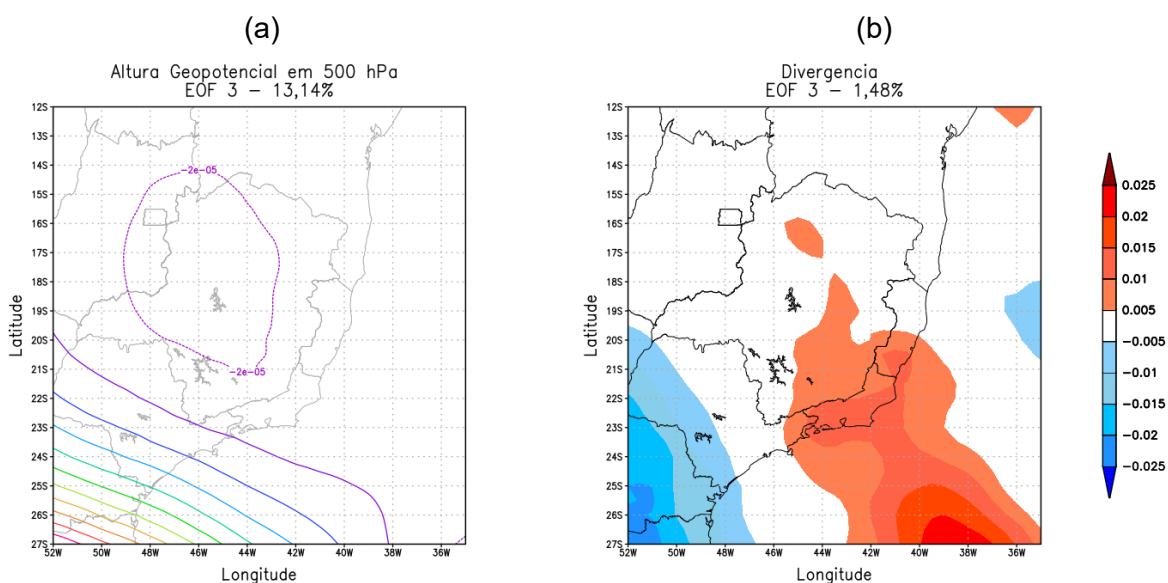
integrada na coluna, na mesma região onde há vorticidade positiva e convergência em 200 hPa.

Os padrões de vento em 200 hPa (4.11d) e 850 hPa (4.11c), em que as terceiras componentes principais representam 13,46% e 10,54%, respectivamente, da variância explicada e apresentam algumas variações no padrão de circulação.

O campo de 200 hPa apresenta um escoamento que pode indicar a presença de um cavado em altitude a leste dos Andes e uma circulação anticiclônica sobre o litoral entre o Sudeste e o Nordeste. Já o campo em 850 hPa, apresenta uma circulação ciclônica na costa do Sudeste, que colabora com o transporte de umidade do oceano para o litoral.

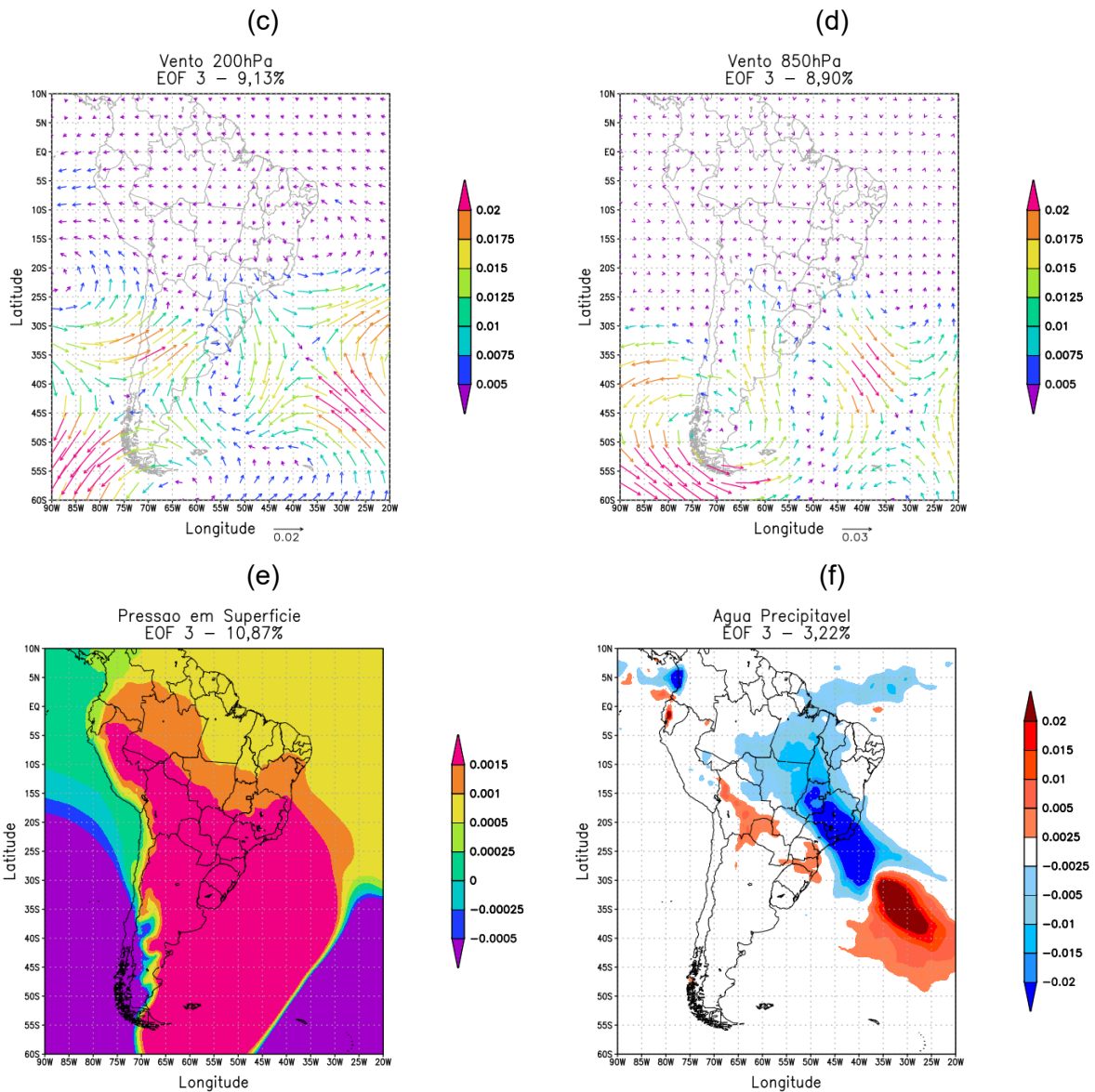
Na figura 4.12, a terceira componente principal dos padrões referentes aos dias com precipitação acima do percentil de 95%, apresenta novamente uma leve ondulação no campo de altura geopotencial (4.12a), sugerindo a existência de um cavado em médios níveis. Na figura 4.12b, observa-se divergência em 200 hPa sobre o estado do Rio de Janeiro.

Figura 4.12 – Terceira Componente Principal.



(Continua)

Figura 4.12 – Conclusão.



CP3 dos campos atmosféricos médios dos dias de precipitação intensa: (a) altura geopotencial em 500 hPa, (b) divergência em 200 hPa, (c) magnitude do vento em 200 hPa, (d) magnitude do vento em 850 hPa, (e) pressão em superfície e (f) água precipitável integrada na coluna atmosférica.

As terceiras EOFs dos campos de vento em 200 hPa (4.12c) e 850 hPa (4.12d), que explicam, respectivamente, 9,13% e 8,90% da variância, indicam um escoamento de noroeste para a região de estudo, corroborando com o campo de água precipitável (4.12f), que explica 3,22% da variância. O campo de

pressão em superfície indica um predomínio de uma anomalia de alta pressão sobre grande parte do continente.

4.4 Estudos de casos

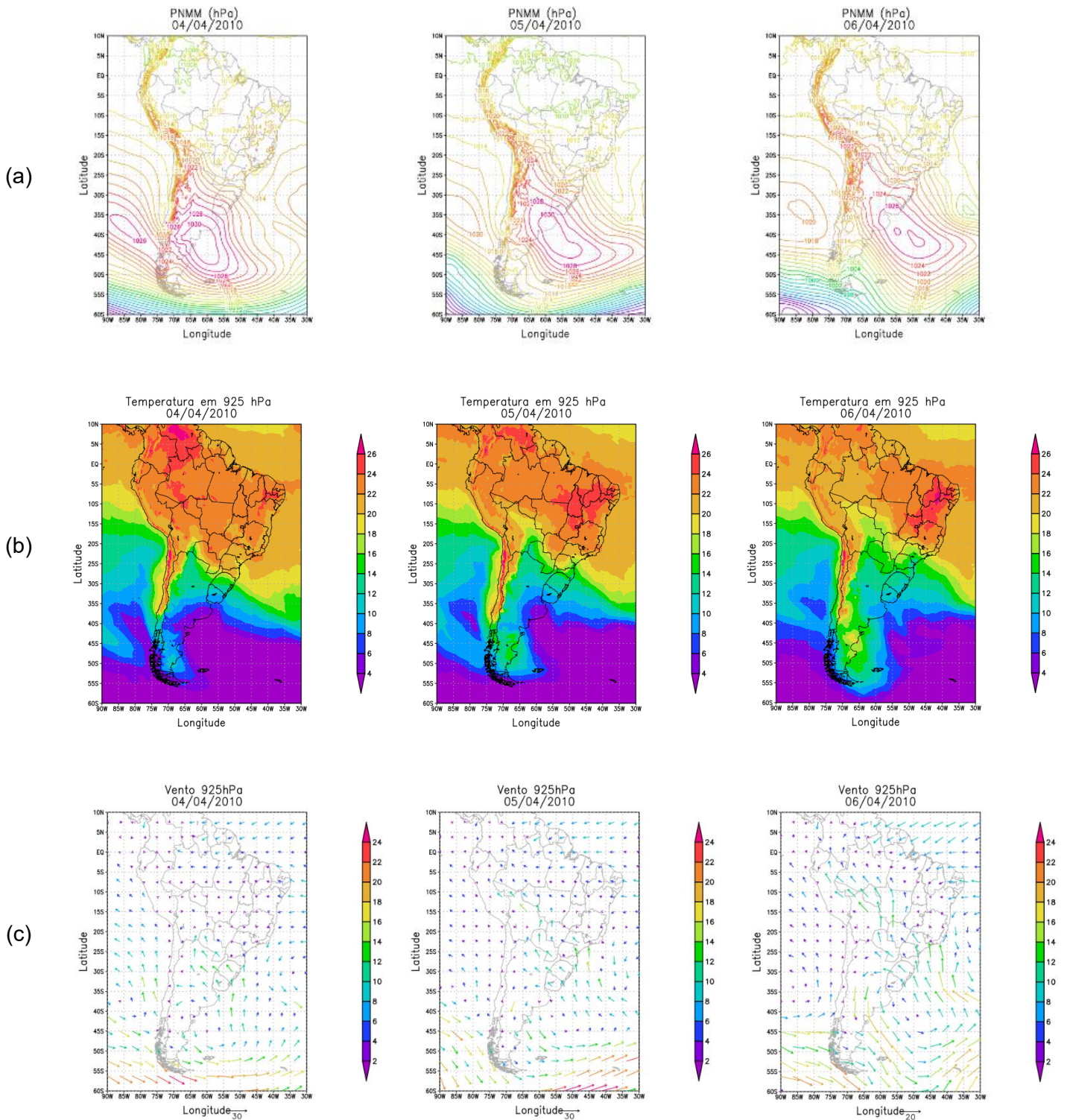
Dois eventos representativos dos impactos das intensas precipitações na MMRJ foram os ocorridos em abril de 2010 e janeiro de 2011 que causaram grande impacto e influenciaram para busca de meios de proteção e prevenção (DERECZYNSKI et al., 2017). Mais recente, em janeiro de 2016, um novo evento de precipitação intensa também resultou em problemas para a região.

4.4.1 Evento: 3 a 6 de abril de 2010

Desde o final do mês de março de 2010, a MMRJ apresentava precipitações diárias, porém no início de abril, a passagem de uma Frente Fria ocasionou precipitações mais intensas, principalmente entre os dias 4 e 5 do mês. Apenas no dia 4, a média do CHIRPS para a região foi de 89,5 mm para área de MMRJ. Seguindo a metodologia indicada por Cavalcanti e Kousky (2009), os padrões observados (Figura 4.13) indicam a atuação do Sistema Frontal na região.

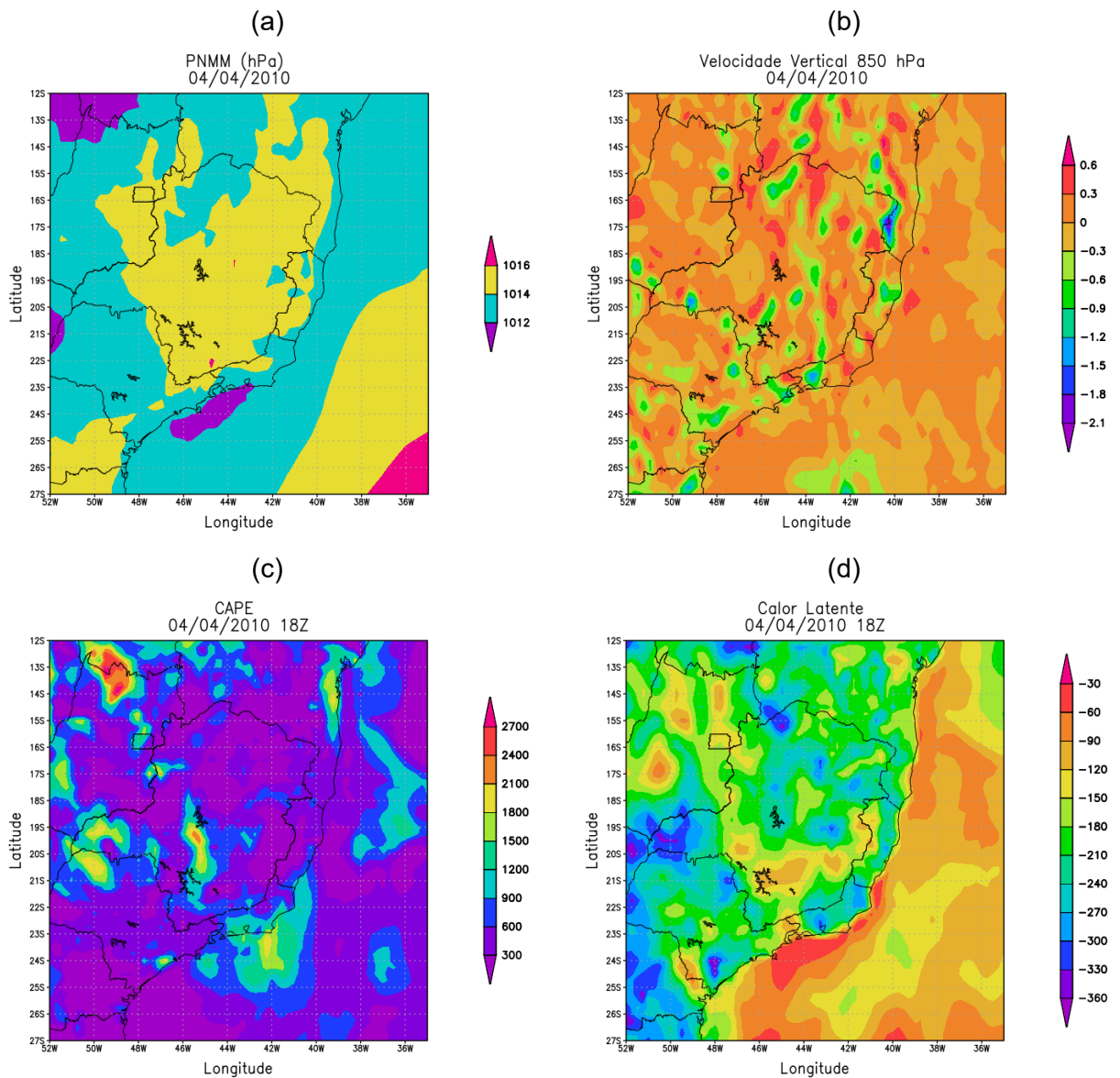
Na Figura 4.13a, observa-se um aumento na pressão ao nível médio do mar (PNMM) sobre a região de estudo no decorrer dos dias 4, 5 e 6, que é o período com maior precipitação associada. A Figura 4.13b apresenta um gradiente de temperatura no nível de 925 hPa, com diminuição de 2°C entre cada um dos dias, o que condiz com a literatura. Também se nota vento predominante de sul, em baixos níveis, na região de estudo, como visto na Figura 4.13c.

Figura 4.13 – Atuação de Frente Fria entre os dias 4 e 6 de abril de 2010.



na costa do Rio de Janeiro ao longo do dia (4.14a), bem como a comprovação de atividade convectiva representada pelo movimento vertical ascendente (valores negativos) sobre a região (4.14b), pela Energia Potencial Convectiva Disponível (CAPE), no horário das 18Z (4.14c) e pelo maior fluxo ascendente de calor latente (4.14d) sobre a MMRJ em relação as regiões adjacentes, colaborando para o elevado volume de chuva durante o dia.

Figura 4.14 – Análise do dia 04 de abril de 2010 com foco na região Sudeste.



Campos de: (a) Pressão ao nível médio do mar (hPa), (b) Velocidade Vertical no nível de 850 hPa (m/s), (c) Índice CAPE (J/Kg) e (d) Fluxo de Calor Latente (W/m^2).

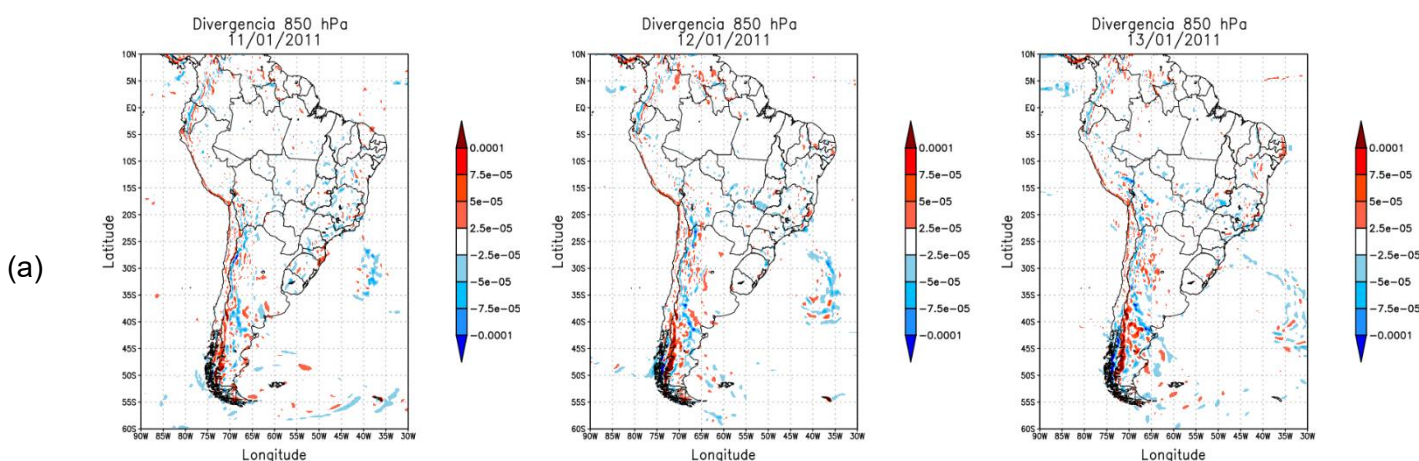
O evento ocorrido em abril de 2010 resultou em mais de 200 mortes, sendo impactante na região do Morro do Bumba, na cidade de Niterói, onde houve mais de 60 óbitos devido ao deslizamento verificado no dia 7, após o período de chuva (CALHEIROS, 2013). A região se tratava de um lixão desativado e houve ocupação indevida de moradores de baixa renda. Além das mortes mais de 12 mil pessoas ficaram desabrigadas na MMRJ (ARAÚJO et al., 2011; AIRES et al., 2017).

4.4.2 Evento: 10 a 18 de janeiro de 2011

Entre os dias 10 e 18 de janeiro, um episódio de ZCAS resultou em grandes acumulados de precipitação e implicou no maior desastre registrado no país, na Região Serrana do Rio de Janeiro (RSRJ), que engloba algumas cidades da MMRJ, de acordo com a reportagem publicada no G1.

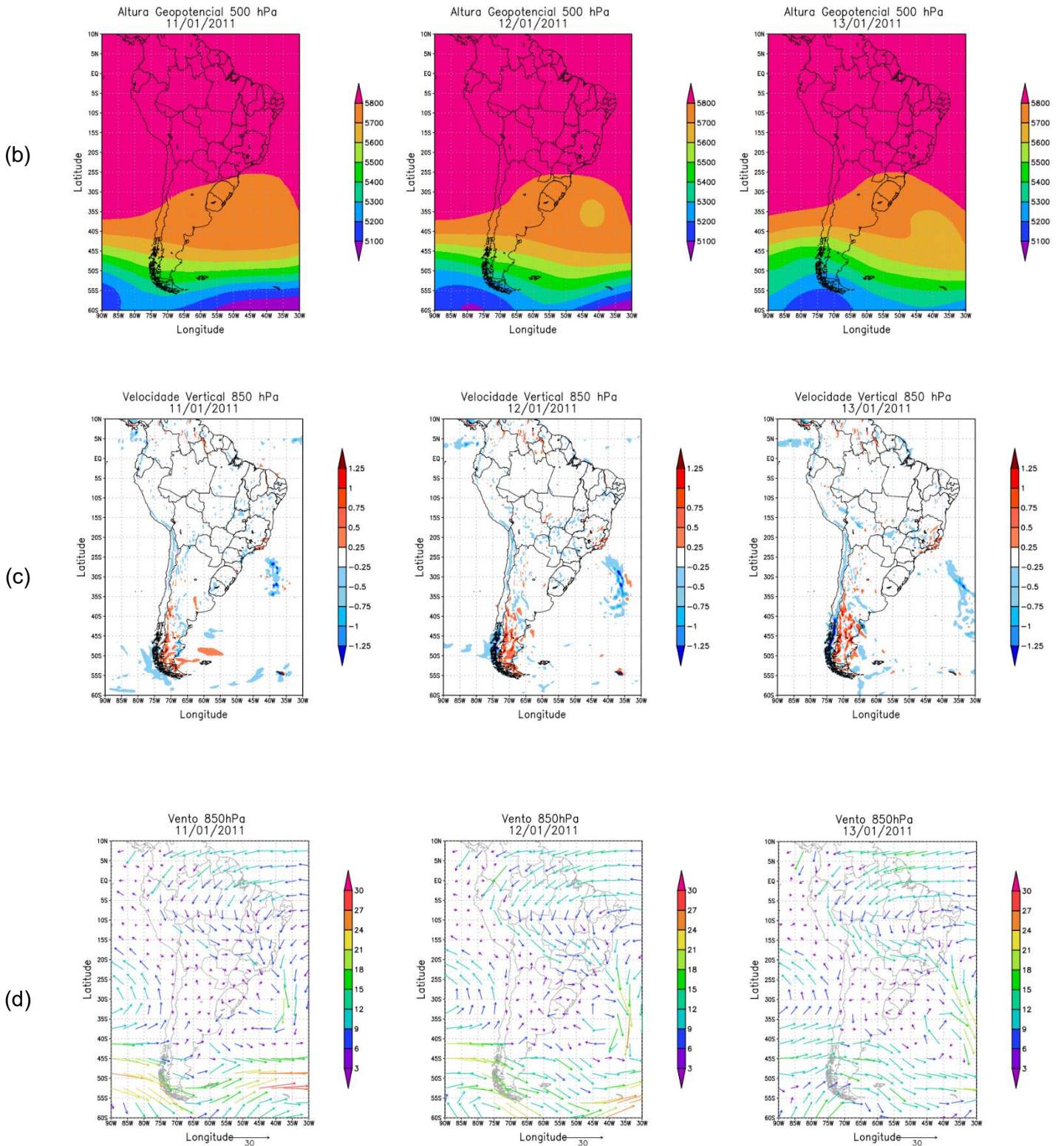
Por mais que tenha ocorrido entre os dias 10 e 18, o período entre os dias 11 e 16 foram os mais determinantes para a tragédia devido à chuva persistente, que resultou em deslizamentos e inundações pela MMRJ (BARCELLOS; QUADRO, 2019). As Figuras 4.15 e 4.16 ilustram o período da ZCAS entre os dias 11 e 16.

Figura 4.15 – Dias 11, 12 e 13 do evento de ZCAS de janeiro de 2011.



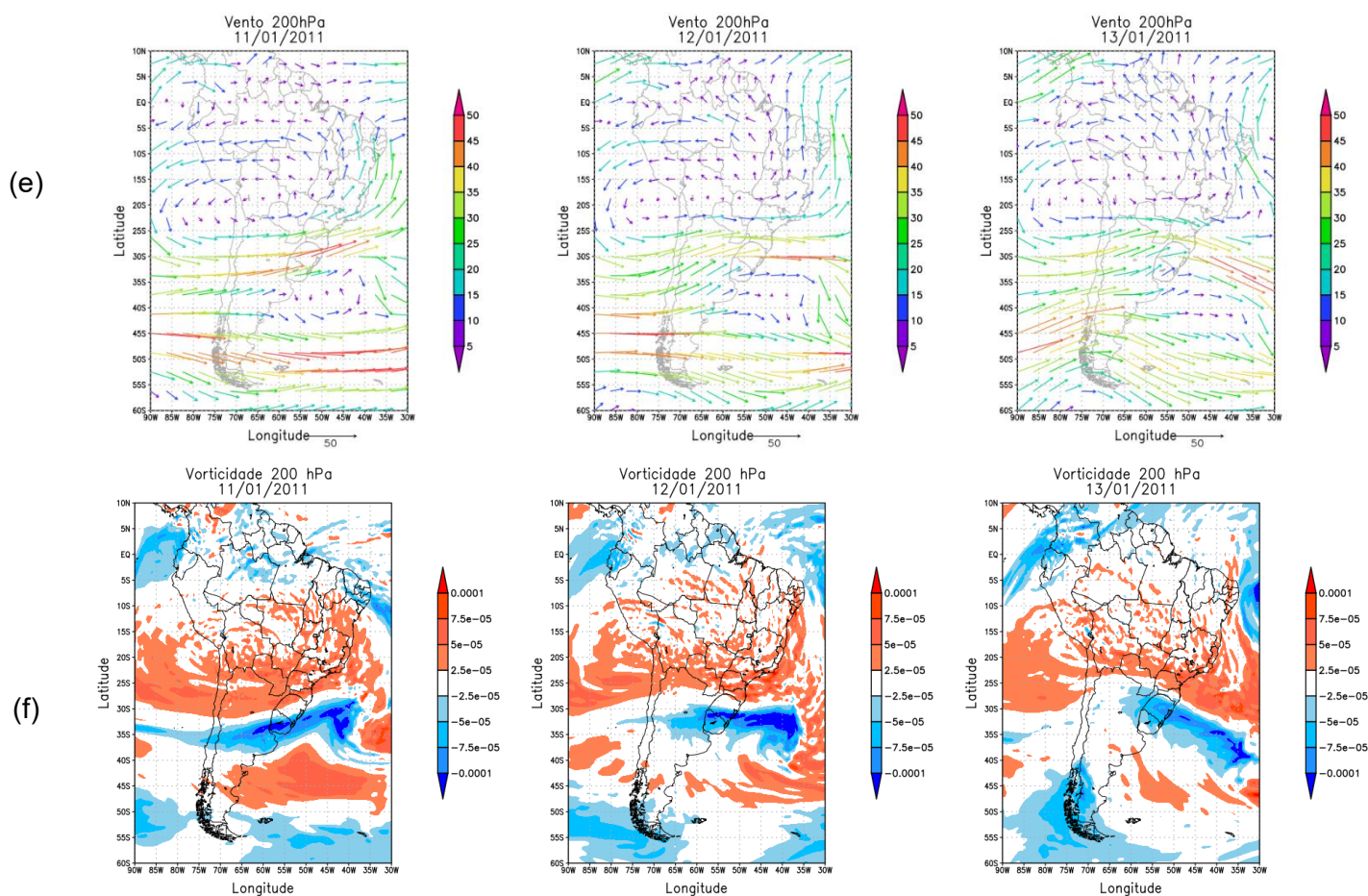
(Continua)

Figura 4.15 – Continuação.



(Continua)

Figura 4.15 – Conclusão.



Campos de: (a) Divergência em 850 hPa, (b) Altura Geopotencial em 500 hPa, (c) Velocidade Vertical (m/s), (d) Magnitude do vento em 850 hPa (m/s), (e) Magnitude do vento em 200 hPa (m/s), (f) Vorticidade em 200 hPa.

Analisando o campo de divergência em 850 hPa, nota-se um padrão com valores negativos de divergência, indicando convergência em baixos níveis. O campo de velocidade vertical também apresenta valores negativos, o que implica em movimentos ascendentes.

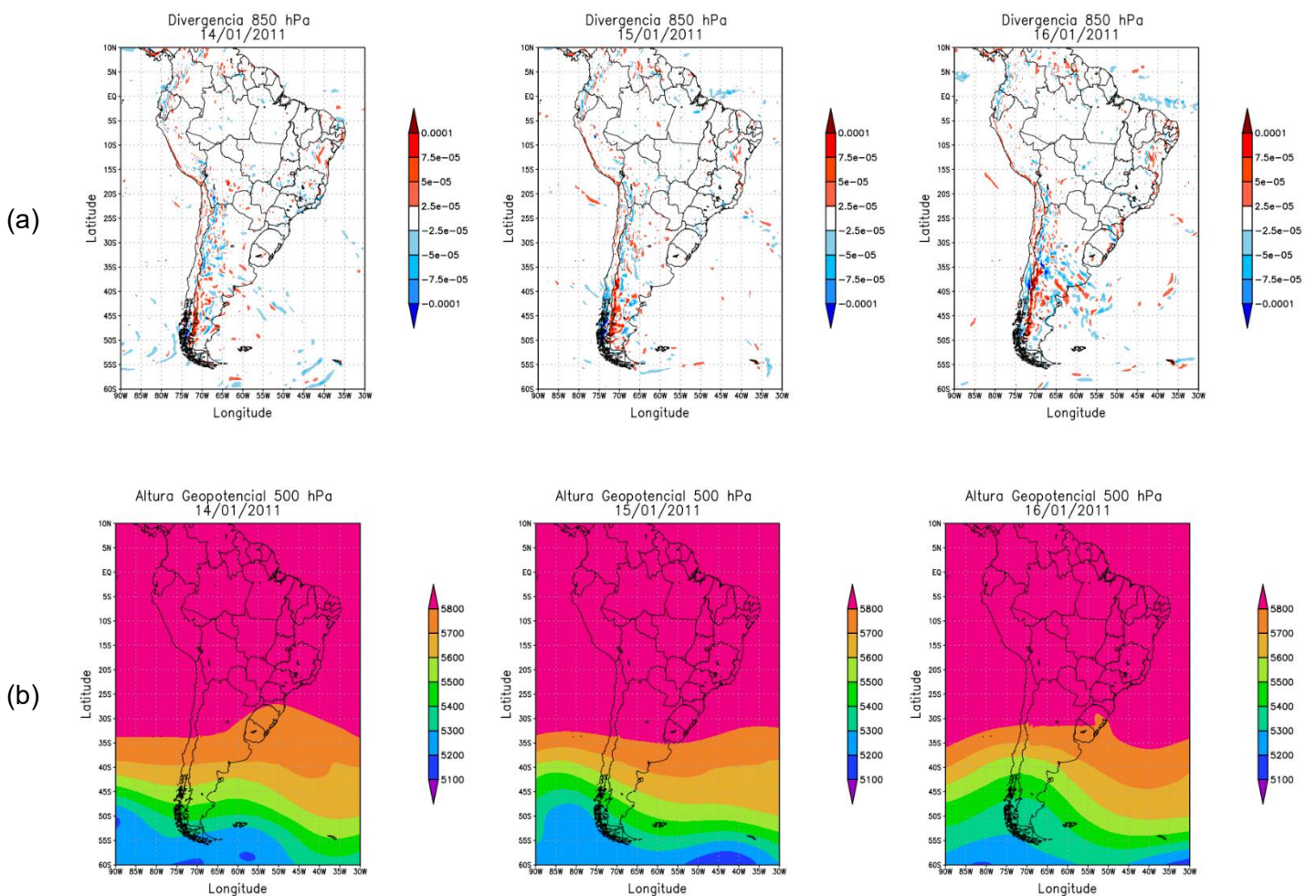
Entre os dias 11 e 13, é possível notar a formação de um cavado em médios níveis a sudeste do continente. O vento em 850 hPa como orientação predominante a direção NO-SE na região da ZCAS e os campos de vorticidade e vento em 200 hPa indicam movimento anticiclônico em altos níveis.

Na Figura 4.16, o campo de divergência ainda indica convergência entre os dias 14 e 15, perdendo intensidade no dia 16.

No campo de altura geopotencial, ainda há atuação do cavado no sudeste do continente no dia 14. No dia 15 o cavado se dissipa e no dia 16 há um processo de formação de um novo cavado a leste dos Andes.

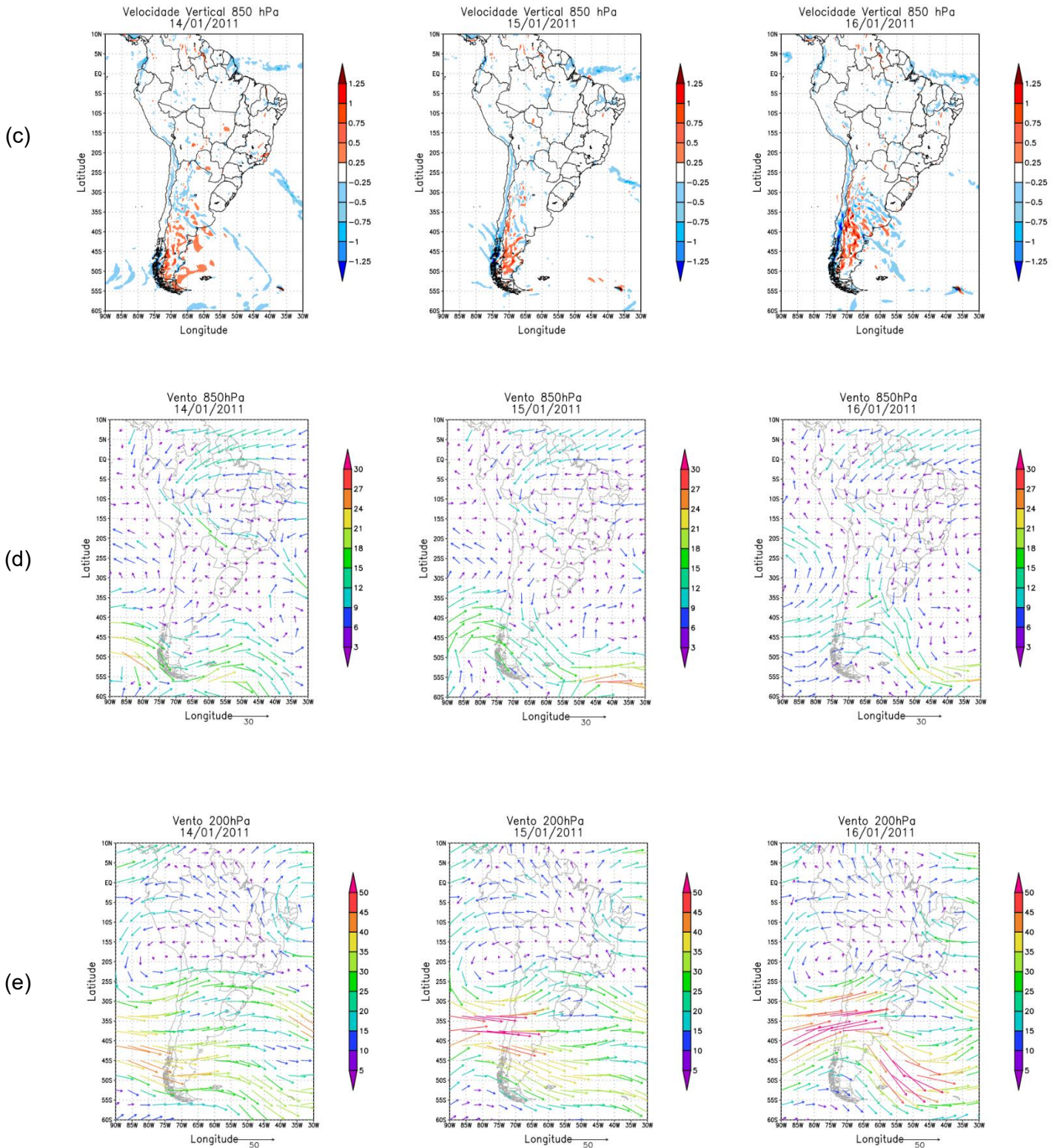
O vento em 850 hPa persiste na direção NO-SE, indicando o transporte de umidade para a região. Nos campos em altos níveis (vento em 200 hPa e vorticidade), há uma perda de intensidade no movimento entre os dias 15 e 16, mas que continua colaborando para circulação anticiclônica em altitude influenciando a região.

Figura 4.16 – Dias 14, 15 e 16 do evento de ZCAS de janeiro de 2011.



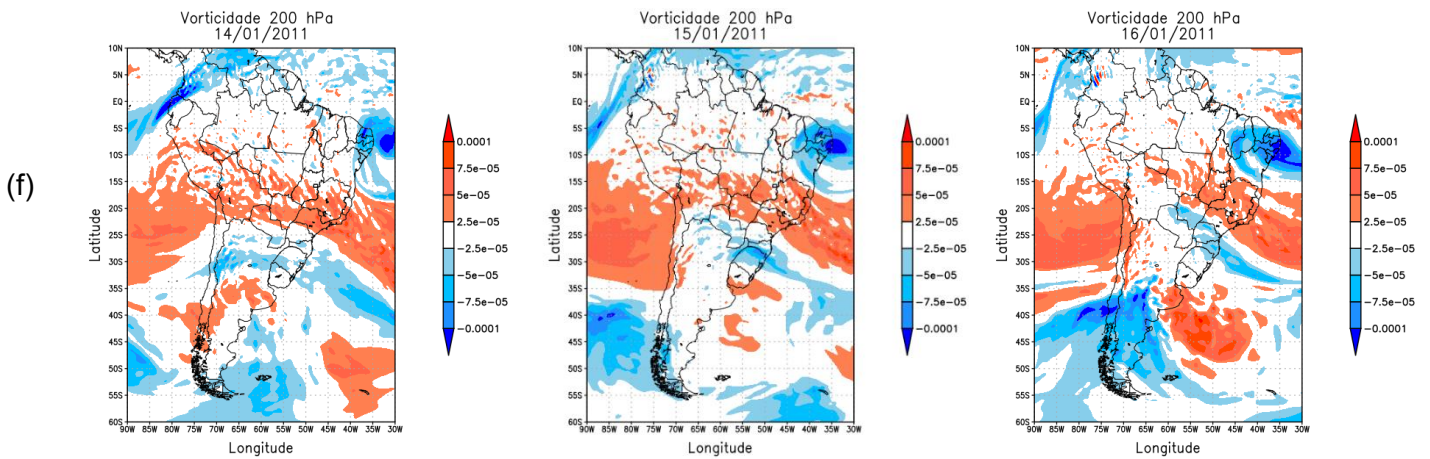
(Continua)

Figura 4.16 – Continuação.



(Continua)

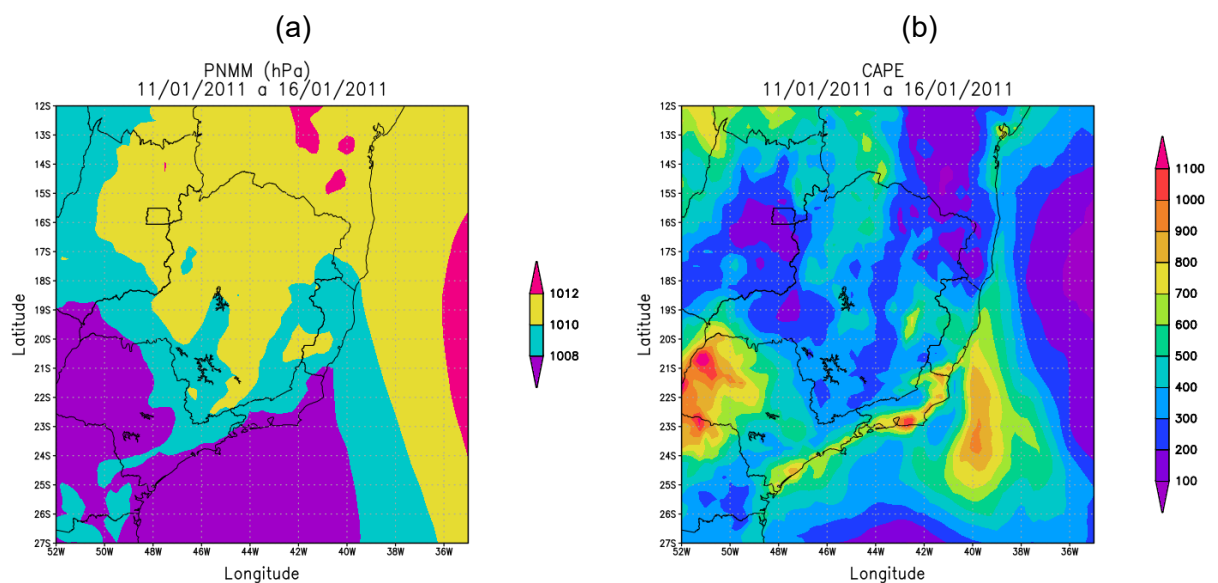
Figura 4.16 – Conclusão.



Campos de: (a) Divergência em 850 hPa, (b) Altura Geopotencial em 500 hPa, (c) Velocidade Vertical (m/s), (d) Magnitude do vento em 850 hPa (m/s), (e) Magnitude do vento em 200 hPa (m/s), (f) Vorticidade em 200 hPa.

Avaliando a média do período de 11 a 16 de janeiro, com foco na região Sudeste (Figura 4.17), observou-se uma persistência de uma menor pressão na MMRJ em comparação com as áreas ao redor (4.17a) e um índice CAPE também superior na área de estudo (4.17b), configuração que pode ter possibilitado a permanência da instabilidade e a chuva persistente na região.

Figura 4.17 – Análise do período de 11 a 16 de janeiro de 2011 na região Sudeste.



Campos de: (a) Pressão ao nível médio do mar (hPa) e (b) Índice CAPE (J/Kg).

Segundo reportagem publicada no G1, os deslizamentos atingiram sete municípios da RSRJ, resultaram em mais de 900 mortes, milhares de pessoas ficaram desabrigadas e houve registro de casos de leptospirose, devido a contaminação da água.

Como observado por Dereczynski et al. (2017), os dois eventos apresentados acima evidenciaram a vulnerabilidade do país em relação a eventos extremos de caráter natural.

Devido a esses eventos foram instaladas sirenes de alertas nas áreas de risco da MMRJ, sendo 163 sirenes em 105 comunidades apenas na cidade do Rio de Janeiro, como abordado em reportagem do G1, disponível no link <http://g1.globo.com/rio-de-janeiro/noticia/2016/03/rjtv-mostra-como-funciona-sistema-de-sirenes-para-alerta-de-chuvas.html>.

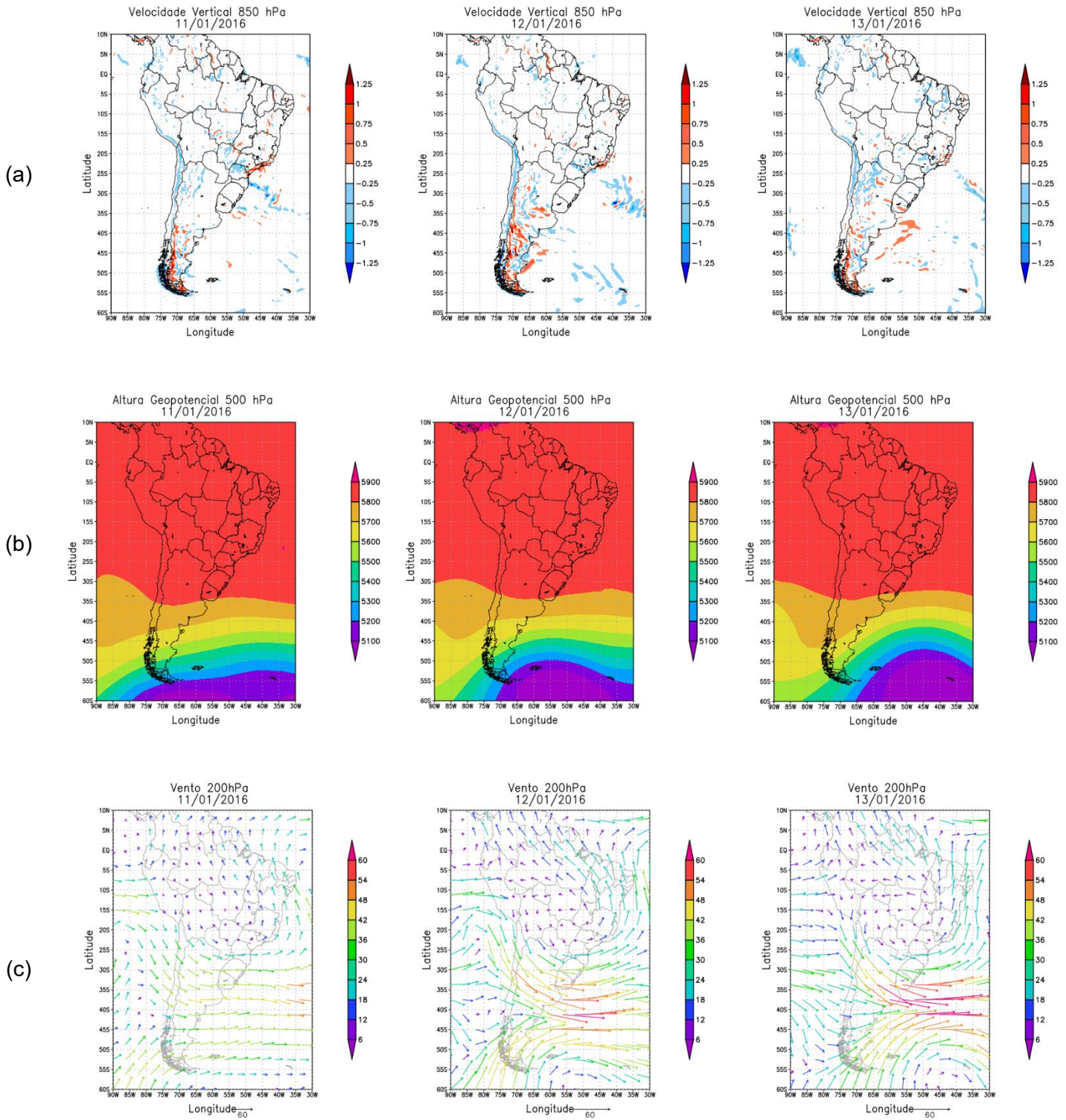
Até o episódio da RSRJ, não havia um órgão público específico para monitoramento de eventos severos no país, sendo criado, ainda em 2011, o Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais (CEMADEN), com o objetivo de monitorar e prever eventos hidrometeorológicos e geodinâmicos, além de promover desenvolvimentos científicos e tecnológicos para prevenção e mitigação de eventos extremos em todo o país.

4.4.3 Evento: 12 a 16 de janeiro de 2016

Em janeiro de 2016, um novo evento de ZCAS causou transtorno em várias áreas da MMRJ. O evento ocorreu entre os dias 11 e 16 de janeiro, sendo que no dia 16, a aproximação de um sistema frontal potencializou a precipitação na região, apresentando um acumulado diário médio na MMRJ de 105,4 mm, pelos dados do CHIRPS.

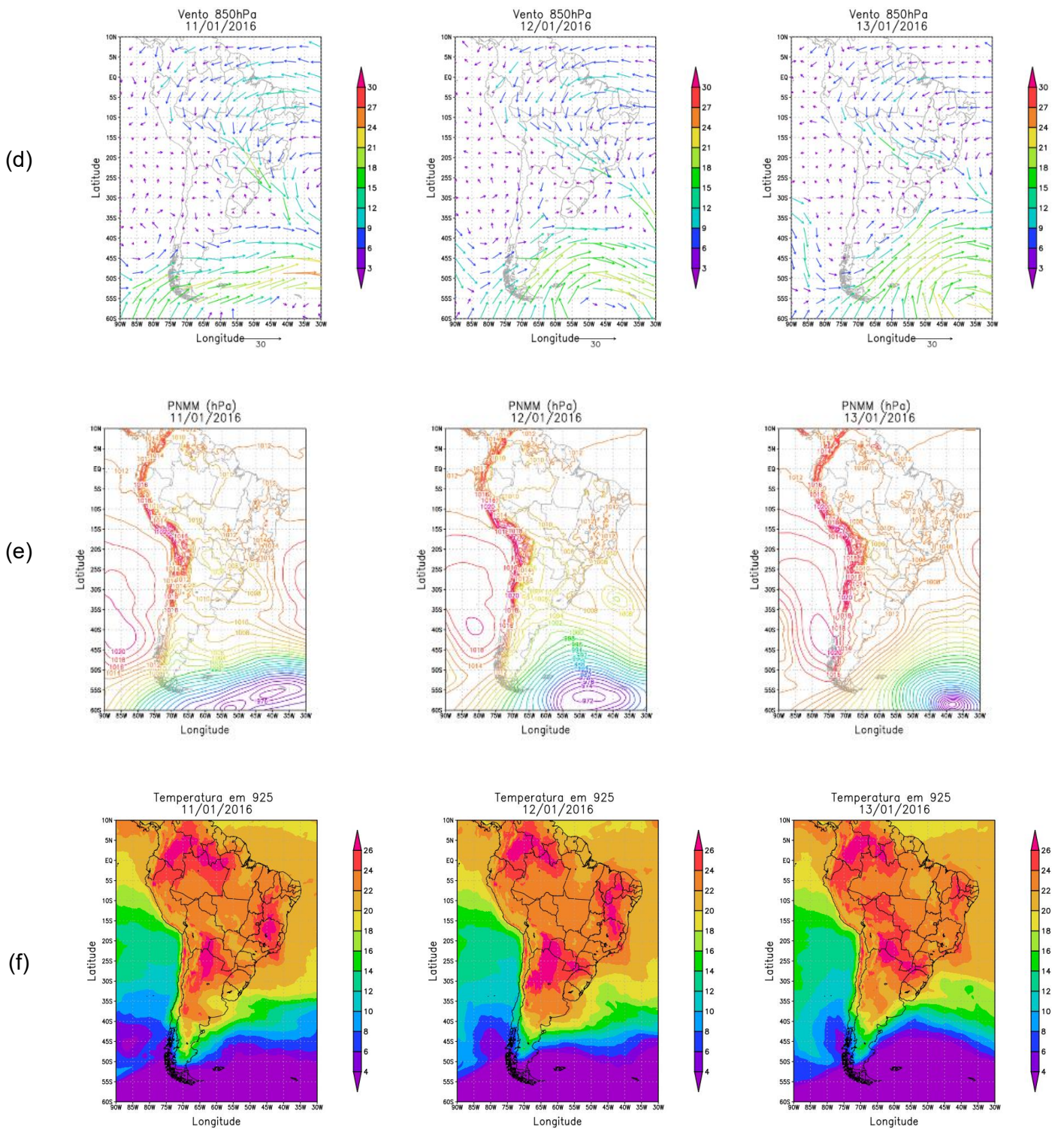
As Figuras 4.18 e 4.19 apresentam os padrões atmosféricos médios diários do período do evento.

Figura 4.18 – Dias 11, 12 e 13 do evento de ZCAS de janeiro de 2016.



(Continua)

Figura 4.18 – Conclusão.

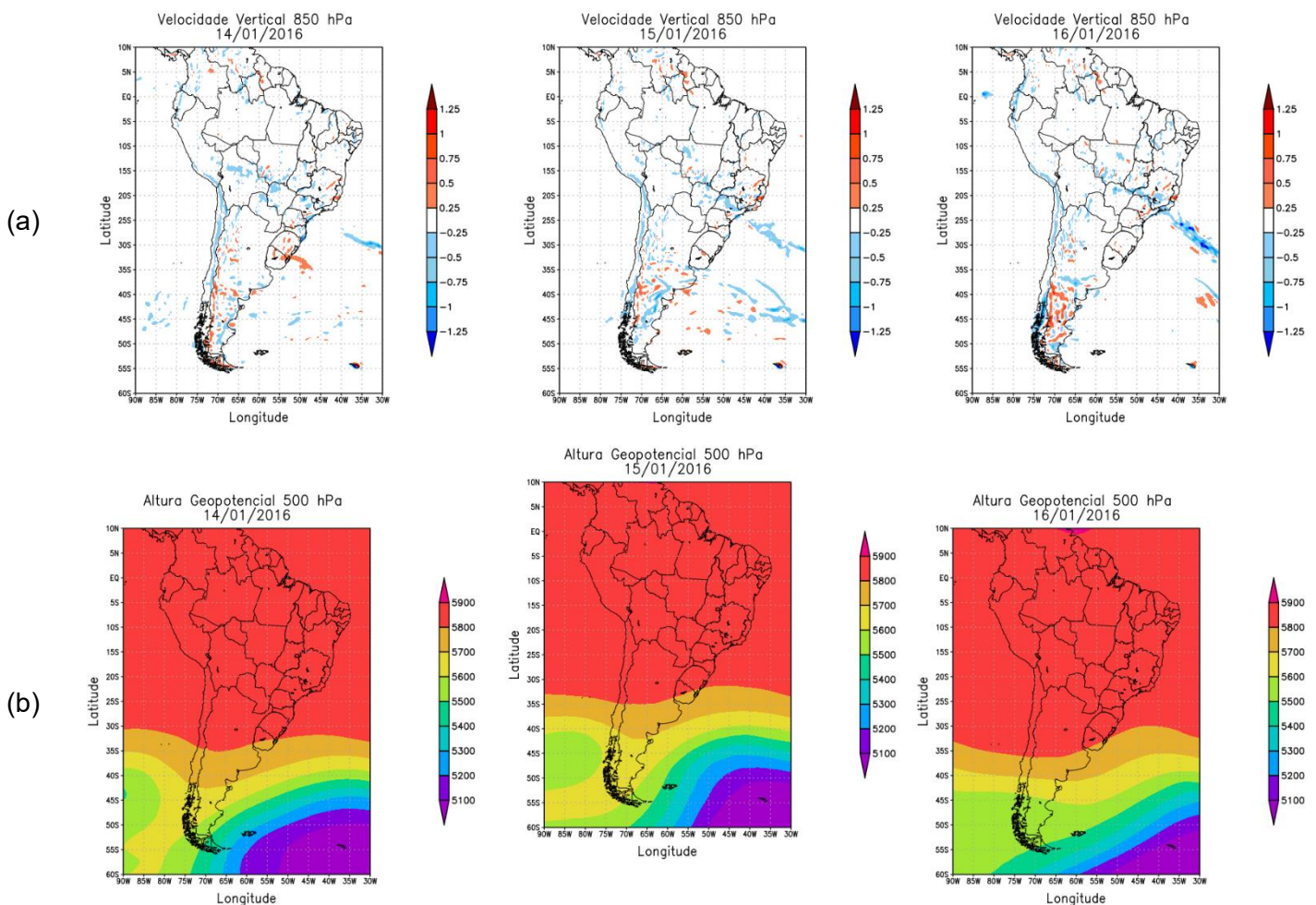


Campos de: (a) Velocidade Vertical em 850 hPa (m/s), (b) Altura Geopotencial em 500 hPa, (c) Magnitude do vento em 200 hPa (m/s), (d) Magnitude do vento em 850 hPa (m/s), (e) Pressão ao nível médio do mar (hPa), (f) Temperatura em 925 hPa (°C).

Na Figura 4.18 observa-se um padrão de movimento vertical ascendente em baixos níveis entre os dias 11 e 13, bem como um desenvolvimento de um cavado em médios níveis. Um movimento anticiclônico em 200 hPa pode ser notado no campo de vento e o vento em 850 hPa apresenta direção NO-SE, na mesma direção da região com movimento ascendente em 850 hPa.

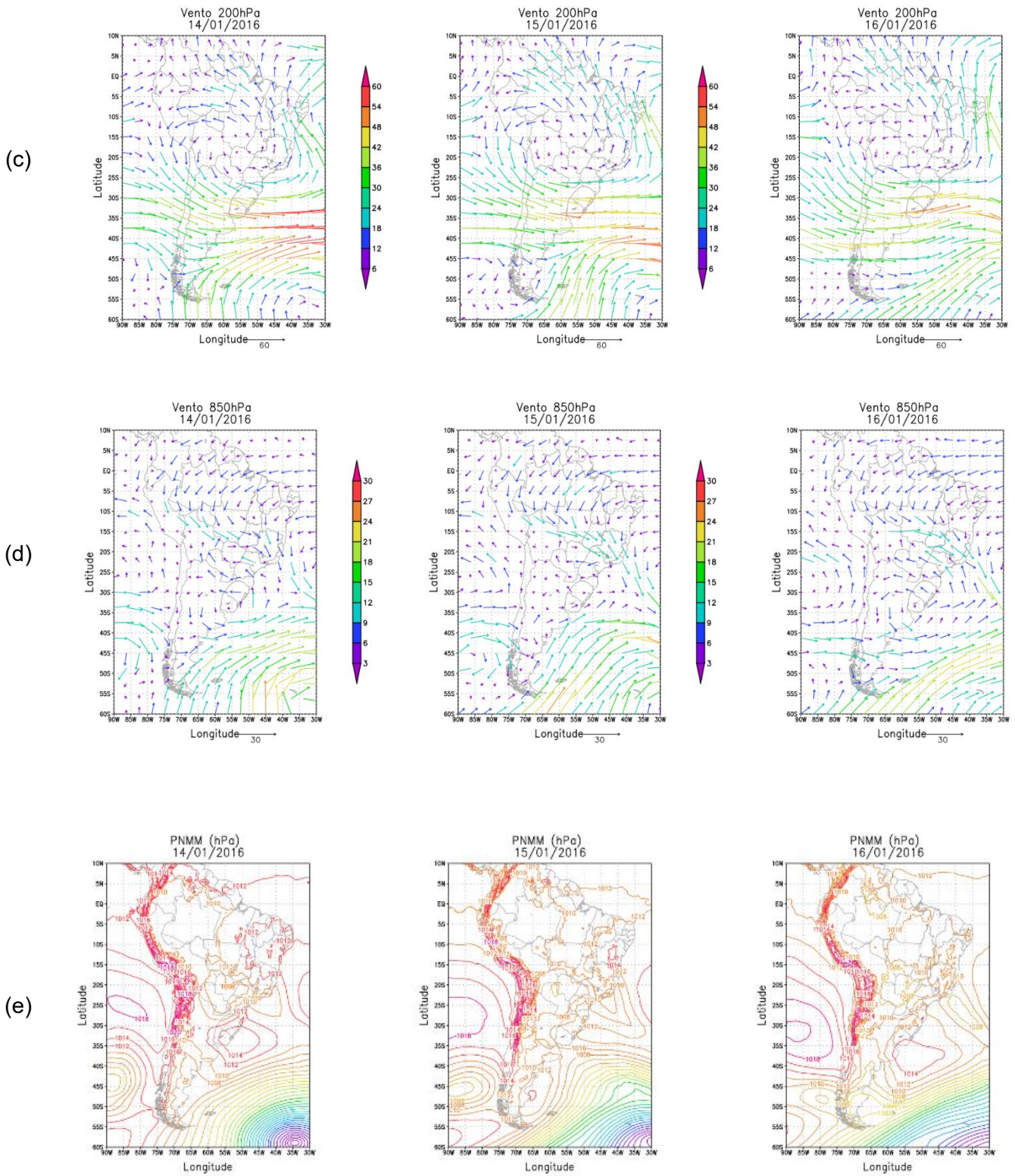
No campo de PNMM é possível observar uma diminuição da pressão entre os dias 11 e 13, ao passo que no campo de temperatura em 925 hPa observa-se um aumento do gradiente de temperatura no leste da Argentina a partir do dia 13, no processo de formação do sistema frontal.

Figura 4.19 – Dias 14, 15 e 16 do evento de ZCAS de janeiro de 2016.



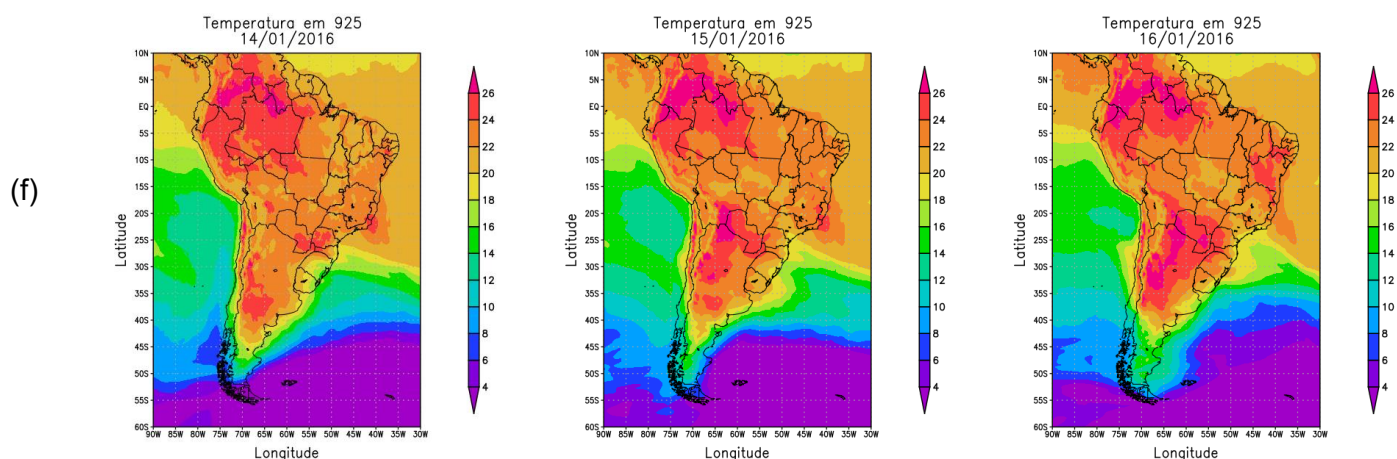
(Continua)

Figura 4.19 – Continuação.



(Continua)

Figura 4.19 – Conclusão.



Campos de: (a) Velocidade Vertical em 850 hPa (m/s), (b) Altura Geopotencial em 500 hPa, (c) Magnitude do vento em 200 hPa (m/s), (d) Magnitude do vento em 850 hPa (m/s), (e) Pressão ao nível médio do mar (hPa), (f) Temperatura em 925 hPa (°C).

Analisando os padrões atmosféricos entre os dias 14 e 16 (Figura 4.19), é possível notar a manutenção dos movimentos ascendentes na região da ZCAS, em especial no dia 16, em que os valores de velocidade vertical são maiores. O cavado em médios níveis a sudeste do continente está presente, bem como a circulação anticiclônica em 200 hPa.

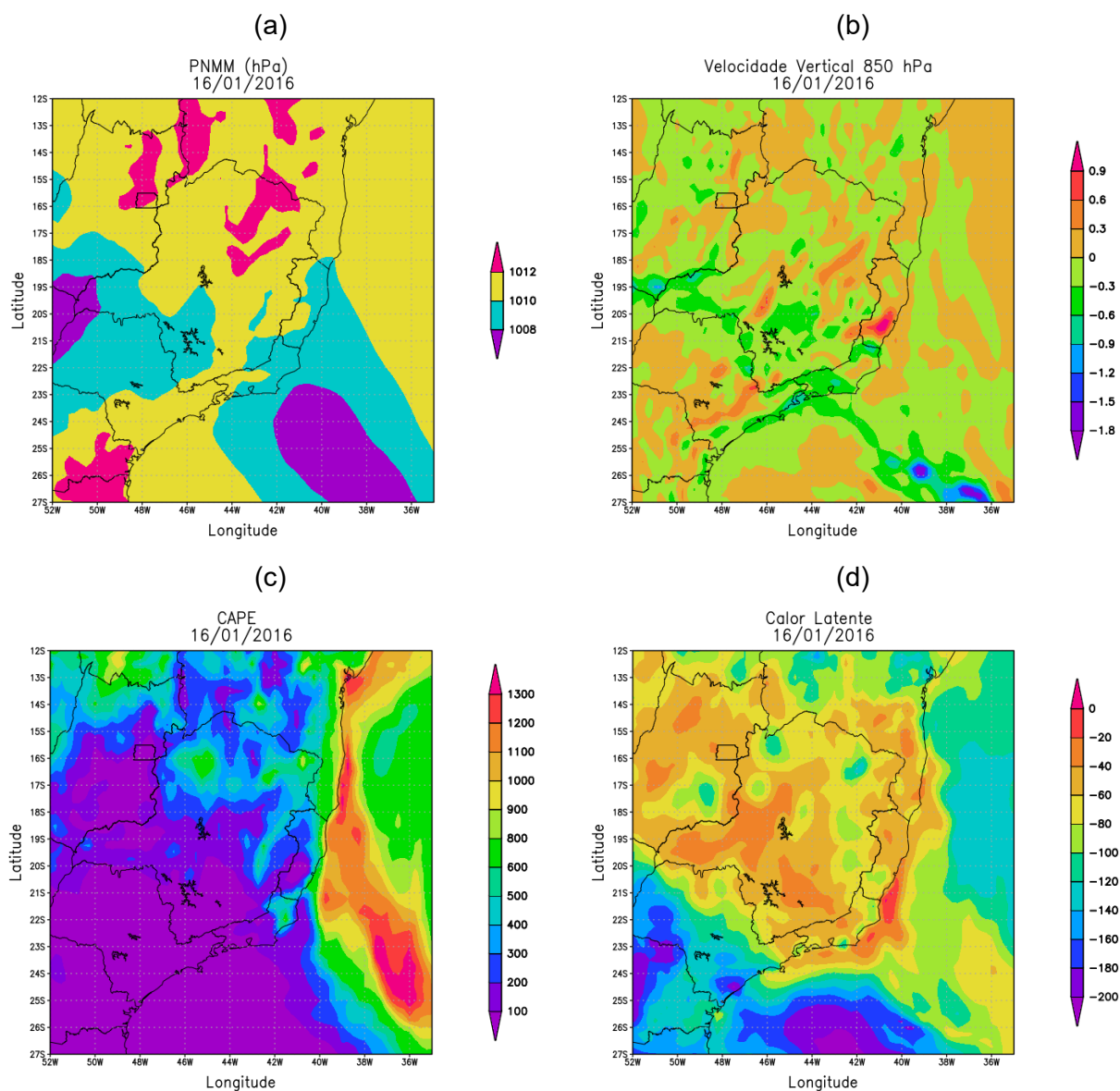
Observando o campo de vento em 850 hPa, há a predominância do vento na direção NO-SE, padrão do evento de ZCAS, mas no dia 16, quando houve os maiores acumulados de precipitação, nota-se também a presença do vento de quadrante sul, indicando a presença do sistema frontal sobre o oceano, potencializando a precipitação na região.

O campo de temperatura em 925 hPa comprova a presença da frente fria, com um gradiente de temperatura a leste das regiões Sul e Sudeste.

Na análise com foco na região Sudeste (Figura 4.20) durante o dia 16, onde houve o maior acumulado diário, mesmo com o baixo valor do índice CAPE (4.20c) e do fluxo de calor latente (4.20d), devido ao deslocamento do sistema frontal, nota-se uma pressão mais baixa sobre o oceano adjacente ao estado do

Rio de Janeiro (4.20a) e movimento vertical ascendente do ar, colaborando para a instabilidade local e permanência da precipitação.

Figura 4.20 – Análise do dia 16 de janeiro de 2016 com foco na região Sudeste.



Campos de: (a) Pressão ao nível médio do mar (hPa), (b) Velocidade Vertical no nível de 850 hPa (m/s), (c) Índice CAPE (J/Kg) e (d) Fluxo de Calor Latente (W/m^2).

O evento de janeiro de 2016 resultou em grande acumulado de precipitação, principalmente no dia 16 e causou transtornos na MMRJ com deslizamentos de terra, enchentes, vários pontos de alagamento e pessoas desabrigadas, de acordo com reportagens da Agência Brasil e do G1.

Por outro lado, diferente dos eventos anteriores, não houve registros de mortes e nem de feridos. Esse importante ponto, vai de encontro com as formas encontradas de prevenção e mitigação, até o momento, como a instalação de sirenes de alertas e o monitoramento feito pelo Cemaden, como indicado no tópico anterior.

4.5 Discussões

Como analisado no início do capítulo 4, não foi observado uma tendência estatisticamente significativa de eventos de precipitação intensa, o que se apresenta como uma discordância em relação a estudos já realizados e conforme o ponto levantado anteriormente, há a possibilidade dessa contraposição ocorrer devido a diferença dos dados utilizados.

O CHIRPS se mostrou um dado robusto no que diz respeito a série temporal, resolução espacial e apresentação das médias mensais, que condizem com as médias observadas da região. Por outro lado, ele deixa uma impressão de subestimar a precipitação diária, uma vez que não apresenta valores tão elevados como os apresentados em pluviômetros, o que nos leva a refletir sobre a distribuição da precipitação, mesmo em áreas próximas, não ser homogênea.

Para uma melhor aferição do CHIRPS, comparações de dados diários poderiam ser feitas em relação a outros dados semelhantes como o MSWEP e com dados observados de diferentes estações pluviométricas, ficando um ponto a ser analisado para estudo futuros.

Mesmo não apresentando uma tendência em relação a quantidade de eventos de precipitação intensa, as análises dos demais índices de extremos indicam uma tendência de aumento da intensidade desses eventos, corroborando com os estudos indicados e que nos faz refletir sobre um ponto importante e determinante para escolha do tema que diz respeito a vulnerabilidade da região.

Conforme estudos realizados, como Marengo et al. (2020), e reportagens apresentadas no início deste estudo, a MMRJ é uma região extremamente

suscetível a ocorrência de desastres naturais provocados por precipitação. A elevada densidade populacional, o elevado número de pessoas que moram em zonas de risco, como nos morros, a falta de saneamento e a precária infraestrutura, estão sempre passíveis de ocorrência de catástrofes de caráter social, ambiental e econômico.

A constatação do aumento na intensidade dos eventos de precipitação intensa, deixa um alerta para buscar formas de mitigação para os riscos apresentados, com a finalidade de diminuir os impactos causados por eventos de chuvas extremas.

No que diz respeito às análises de componentes principais, o método se apresenta como uma forma interessante para estudo relacionados a climatologia, indicando padrões atmosféricos que descrevem de forma plausível as condições para ocorrência de eventos precipitantes no período analisado.

Outros campos, relacionados a cada sistema precipitante poderiam ser utilizados para melhor análise e compreensão dos sistemas, mas para compreensão de padrões médios no período considerado chuvoso na MMRJ, a análise por meio de EOF se mostrou robusta e coerente com a literatura.

Analisando os eventos apresentados, foi possível observar os padrões atmosféricos correspondentes aos dois principais sistemas precipitantes da região (ZCAS e Frente Fria), que são os dois principais precursores de eventos de precipitação intensa.

Nota-se também o despreparo que a população e o governo apresentavam para proteção e prevenção de eventos extremos, sendo necessário a ocorrência de desastres naturais que se tornaram tragédias na MMRJ, que são os casos de abril de 2010 e janeiro de 2011, para a busca de formas de prevenção e mitigação de eventos dessa magnitude.

De acordo com o Atlas Brasileiro de Desastres Naturais (CEPED-UFSC, 2012) as três principais ocorrências de desastres naturais no estado do Rio de Janeiro

e mais especificamente na MMRJ, são enxurradas, inundações e movimentos de massa.

As enxurradas estão relacionadas ao aumento da precipitação e sua concentração em um menor espaço de tempo. As inundações estão relacionadas à cheia e aumento dos níveis dos rios, associando-se com um período de chuvas mais contínuas. Já os movimentos de massa estão relacionados a precipitação, a geomorfologia local e a ação antrópica com uso e ocupação da terra, em especial das áreas de risco.

A criação de um centro específico para monitoramento de desastres de caráter natural e utilização de recursos como as sirenes, colaboraram de certa forma para diminuição dos prejuízos, principalmente no que diz respeito aos óbitos, uma vez que o caso apresentado de janeiro de 2016, apresentou intensidade semelhante, mas sem ocorrência de óbitos.

Porém, o aumento na intensidade dos eventos de precipitação intensa também implica em um aumento na possibilidade de deslizamentos, enchentes, alagamentos e inundações.

Como mencionado anteriormente, a vulnerabilidade da população e da região, devido a elevada densidade demográfica e ocupação de áreas de risco continuam sendo problemas a serem resolvidos em virtude da falta de infraestrutura e saneamento, sendo um problema de caráter econômico e social, ao invés de natural, mesmo que os índices indiquem um aumento na intensidade desses eventos ao longo dos últimos anos.

5 CONCLUSÃO

Devido aos recentes eventos de precipitação intensa no município do Rio de Janeiro e cidades próximas e devido a vulnerabilidade da região a esses eventos, o estudo procurou avaliar a tendência de eventos de precipitação intensa em relação a quantidade e intensidade desses eventos, no período chuvoso da MMRJ.

Na segunda parte, procurou-se analisar os padrões atmosféricos médios por meio da análise de componentes principais e por fim realizar uma breve discussão em relação aos impactos dos eventos de precipitação intensa na região.

A definição do período chuvoso se deu pela média mensal de precipitação utilizando os dados do CHIRPS. Considerou-se como limiar para um mês chuvoso, o mínimo de 100 mm/mês. Com isso, o período chuvoso compreendeu o período entre outubro e abril.

De uma forma geral, o CHIRPS se apresenta como uma interessante fonte de dados para estudos de uma determinada região sem a preocupação com a quantidade e qualidade dos dados observados de estações pluviométricas e uma distribuição homogênea dos dados com uma boa resolução espacial (5 km).

Na análise de tendência de eventos de precipitação foi utilizado o percentil de 95% e aplicado o teste não paramétrico de Mann-Kendall e a Curvatura de Sen.

Diferente do que era esperado e do que se encontra em estudo já realizados, o teste não apresentou tendência estatisticamente significativa, uma vez que o p-valor encontrado foi superior ao valor do nível de significância, aceitando a hipótese nula, de que não há tendência na série. A curvatura de Sen corroborou com o resultado, ao não apresentar inclinação da reta.

Por outro lado, quando aplicado os índices de extremos de precipitação, os resultados obtidos concordaram com estudos anteriores. Os índices de máxima

precipitação em um dia (Rx1day) e máxima precipitação em cinco dias consecutivos (Rx5day) apresentaram tendências positivas em relação aos acumulados de precipitação, ou seja, nos últimos anos houve um aumento na quantidade (volume) de precipitação em um único dia ou em cinco dias seguidos, o que nos possibilitou concluir que há um aumento na intensidade desses eventos nos últimos anos.

O índice R30mm, onde se contava o número de dias com precipitação superior a 30 mm, também retratou uma tendência positiva, indicando um aumento no número de dias com precipitação superior a esse limiar no período entre outubro de 1985 a abril de 2019.

O índice CWD expressa a quantidade consecutiva de dias com precipitação, considerando valores maiores ou iguais a 1 mm/dia. O resultado obtido na reta de tendência demonstra uma diminuição no número de dias com precipitação, confirmando as observações das referências encontradas, onde se indicava um aumento no número de dias secos.

Com isso, por mais que não se observe uma tendência de aumento de eventos, os índices evidenciam que esses eventos estão ficando mais intensos e a precipitação está se concentrando em menos dias. Essa constatação se torna preocupante para regiões de grande vulnerabilidade como é o caso da MMRJ.

Nas análises das EOFs, a primeira e a segunda componentes principais sugerem padrões que remetem aos sistemas de ZCAS e Sistemas Frontais, que são os dois principais sistemas precipitantes da região, conforme abordado na fundamentação teórica. Na terceira componente principal não se observa um padrão relacionado a um sistema de escala sinótica, porém o padrão de circulação apresentado em baixos níveis, pode sugerir a atuação das brisas como sistema precipitante.

Nos estudos de caso, foi possível observar as intensas precipitações associadas aos principais sistemas precipitantes da região. Esses eventos

hidrometeorológicos implicaram em desastres naturais em diferentes proporções.

Até o ano de 2011, havia uma deficiência no monitoramento e prevenção de eventos extremos, que nos casos apresentados resultaram em centenas de mortes, ao passo que no evento analisado de janeiro de 2016, os mesmos problemas foram observados no que diz respeito a bens materiais e infraestrutura, porém sem registros de óbitos devido as intensas chuvas.

Portanto, observa-se que os dados utilizados se concretizaram como uma boa ferramenta para estudos climáticos relacionados a precipitação. Podemos dizer que os sistemas precipitantes na MMRJ foram bem representados por meio da análise de componentes principais e em relação ao estudo de tendências de eventos de precipitação intensa.

Os índices refletem o aumento da intensidade dos eventos, sugerindo um quadro alarmante no que diz respeito a ocorrência de desastres provocados por intensas chuvas nas áreas de risco da MMRJ.

Nos casos específicos analisado, observou-se um avanço nos modos de prevenção e mitigação no evento de 2016, se comparado aos eventos de 2010 e 2011, porém os problemas recorrentes, como inundações, enchentes e deslizamentos de terra, indicam a necessidade de planejamentos em relação a infraestrutura, meio ambiente e população.

Buscar formas de mitigação para essa questão social, no que diz respeito a remoção de casas e abrigos em áreas de risco, consequente realocação da população residente nessas regiões para áreas de menor vulnerabilidade, conscientização da população e criação de meios de transmissão de informação mais rápidos e confiáveis, ainda se faz necessário.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AHRENS, C. D. **Meteorology today**: an introduction to weather, climate, and the environment. 9.ed. Belmont, California, USA: [s.n.], 2009. 621 p.

AIRES, M. et al. Simulação numérica da atmosfera relacionada ao escorregamento de encosta ocasionado por chuvas intensas. **Engevista**, v. 19, n. 1, p. 37-54.

ALVARES, C. A. et al. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711-728, 2013.

AMORIM, M. F.; QUELHAS, O. L. G.; MOTTA, A. L. T. S. A resiliência das cidades frente a chuvas torrenciais: estudo de caso do plano de contingência da cidade do Rio de Janeiro. **Sociedade & Natureza**, v. 26, n. 3, p. 519-534, 2014.

ARAUJO, L. M. N. et al. Avaliação da distribuição espaço-temporal histórica de eventos chuvosos no Rio de Janeiro. In: IWRA WORLD WATER CONGRESS, 14., 2011, Porto de Galinhas. **Proceedings...** 2011. Disponível em: <<https://iwra.org/member/congress/resource/PAP00-5885.pdf>>. Acesso em: 10 dez. 2020.

ÁVILA, A et al. Recent precipitation trends, flash floods and landslides in southern Brazil. **Environmental Research Letters**, v. 11, n. 11, p. 114029, 2016.

BACK, Á. J. Aplicação de análise estatística para identificação de tendências climáticas. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 36, n. 5, p. 717-726, 2001.

BARBOSA, J. P. M. Estudo sobre a evolução dos eventos extremos de precipitação no setor paulista da serra do mar. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 17., 2007, São Paulo. **Anais...** 2007.

BONNET, Suzanna Maria; DEREZYNSKI, Claudine Pereira; NUNES, Ana. Caracterização Sinótica e Climatológica de Eventos de Chuva Pós-Frontal no Rio de Janeiro. **Rev. bras. meteorol.**, São Paulo, v. 33, n. 3, p. 547-557, Set. 2018. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0102-77862018000300547&lng=en&nrm=iso>. Acesso em: 22 Mar 2021.

CALHEIROS, A. G. R. A.; GONÇALVES, R. S. **O direito à moradia de vítimas de áreas de risco: o caso do Morro do Bumba em Niterói, RJ.** 2013. 99p. Dissertação (Mestrado em Serviço Social) - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2013.

CAVALCANTI, I. F. A.; KOUSKY, V. E. Frentes frias sobre o Brasil. In: CAVALCANTI, I. F. A.; FERREIRA, N. J.; JUSTI DA SILVA, M. G. A.; SILVA DIAS, M. A. F. (Ed.). **Tempo e clima no Brasil.** São Paulo: Oficina de Textos. 2009. p.135-147.

CAVALCANTI, I. F. A. Variabilidade interanual da precipitação no Sudeste do Brasil no período 1985-2014 e configurações de extremos. **Revista Climanalise**, 2014.

CENTRO NACIONAL DE MONITORAMENTO E ALERTA DE DESASTRES NATURAIS – CEMADEN. **Histórico da criação do Cemaden.** Cemaden, [s.d.]. Disponível em: <<http://www.cemaden.gov.br/historico-da-criacao-do-cemaden/>>. Acesso em: 12 dez. 2020.

DERECZYNSKI, C. P.; CALADO, R. N.; DE BARROS, A. B. Chuvas extremas no Município do Rio de Janeiro: histórico a partir do Século XIX. **Anuário do Instituto de Geociências**, v. 40, n. 2, p. 17-30, 2017.

DERECZYNSKI, C. P.; OLIVEIRA, J. S.; MACHADO, C. Oo. Climatologia da precipitação no município do Rio de Janeiro. **Revista Brasileira de Meteorologia**, São Paulo, v. 24, n. 1, p. 24-38, mar. 2009.

DERECZYNSKI, C.; SILVA, W. L.; MARENGO, J. Detection and projections of climate change in Rio de Janeiro, Brazil. **American Journal of Climate Change**, v. 2, n. 1, p. 25-33, 2013.

DUBREUIL, V. et al. Os tipos de climas anuais no Brasil: uma aplicação da classificação de Köppen de 1961 a 2015. **Revista Franco-Brasileira de Geografia**, n. 37, 2018.

DUNN, R. J. H. et al. Development of an updated global land in situ-based data set of temperature and precipitation extremes: HadEX3. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 125, n. 16, e2019JD032263, 2020.

EGLER, C. A. G.; GUSMÃO, P. P. **Tendências de uso e ocupação do território e gestão metropolitana face às mudanças climáticas.** Rio de Janeiro: [s.n.], 2011.

ESCOBAR, G. C. J. Padrões de circulação em superfície e em 500 hPa na América do Sul e eventos de anomalias positivas de precipitação no estado de Minas Gerais durante o mês de dezembro de 2011. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 29, n. 1, p. 105-124, 2014.

ESCOBAR, Gustavo Carlos Juan; DE ALMEIDA MARQUES, Ana Clara; DEREZYNSKI, Claudine Pereira. Synoptic patterns of South Atlantic Convergence Zone episodes associated with heavy rainfall events in the city of Rio de Janeiro, Brazil. **Atmosfera**, [S.l.], dez. 2020. ISSN 2395-8812. Disponível em: <<https://www.revistascca.unam.mx/atm/index.php/atm/article/view/52942/46757>>. Acesso em: 22 mar. 2021.

FERRARI, A. L. **Variabilidade e tendência da temperatura e pluviosidade nos municípios de Pirassununga, Rio Claro, São Carlos e São Simão (SP): estudo sobre mudança climática de curto prazo em escala local.** 2012. Tese (Doutorado). Universidade de São Paulo, São Paulo, 2012.

FUNK, C. et al. **The climate hazards infrared precipitation with stations – a new environmental record for monitoring extremes.** *Scientific Data* 2, 150066. doi:10.1038/sdata.2015.66 2015. Disponível em: <<http://chg.geog.ucsb.edu/data/chirps/>>. Acesso em 25 abr. 2019.

G1 REGIÃO SERRANA. **Tragédia na serra do rio completa 5 anos e ainda há espera por ajuda.** Disponível em: <<http://g1.globo.com/rj/regiao-serrana/noticia/2016/01/tragedia-na-serra-do-rio-completa-5-anos-e-ainda-ha-espera-por-ajuda.html>>. Acesso em: 05 maio 2019.

G1 RIO DE JANEIRO. **Chuva na região serrana é maior tragédia climática da história do país.** Disponível em: <<http://g1.globo.com/rio-de-janeiro/chuvas-no-rj/noticia/2011/01/chuva-na-regiao-serrana-e-maior-tragedia-climatica-da-historia-do-pais.html>>. Acesso em: 05 maio 2019.

G1 RIO DE JANEIRO. **Chuva forte causa transtornos em várias regiões do Rio de Janeiro.** 2016. Disponível em: <<http://g1.globo.com/rio-de-janeiro/noticia/2016/01/chuva-forte-causa-transtornos-em-varias-regioes-do-rj.html>>. Acesso em: 12 dez. 2020.

G1 RIO DE JANEIRO. **Passa de 900 o número de mortos na Região Serrana após chuvas**. 2011. Disponível em: <<http://g1.globo.com/rio-de-janeiro/chuvas-no-rj/noticia/2011/02/passa-de-900-o-numero-de-mortos-na-regiao-serrana-apos-chuvas.html>>. Acesso em: 11 dez. 2020

G1 RIO DE JANEIRO. **RJTV mostra como funciona sistema de sirenes para alerta de chuvas**. 2016. Disponível em: <<http://g1.globo.com/rio-de-janeiro/noticia/2016/03/rjtv-mostra-como-funciona-sistema-de-sirenes-para-alerta-de-chuvas.html>>. Acesso em: 12 dez. 2020.

G1 RIO DE JANEIRO. **Tempo muda no Rio com previsão de chuva, raios e ventos**. Disponível em: <<https://g1.globo.com/rj/rio-de-janeiro/noticia/2019/04/08/tempo-muda-no-rio-com-previsao-de-chuva-raios-e-ventos.ghtml>>. Acesso em: 10 maio 2019.

GAN, M. A.; RODRIGUES, L. R.; RAO, V. B. Monção na América do Sul. **Chapter**, v. 19, p. 297-312, 2009.

GARSTANG, M. et al. Amazon coastal squall lines. Part I: structure and kinematics. **Monthly Weather Review**, v. 122, n. 4, p. 608-622, 1994.

GILBERT, R. O. **Statistical methods for environmental pollution monitoring**. [S.l.]: John Wiley & Sons, 1987.

GUIMARÃES, R. C. **Probabilidade e estatística aplicadas à hidrologia**. [S.l.: s.n.], 2015.

HAYLOCK, M. R. et al. Trends in total and extreme South American rainfall in 1960–2000 and links with sea surface temperature. **Journal of Climate**, v. 19, n. 8, p. 1490-1512, 2006.

HERSBACH, H.; BELL, B.; BERRISFORD, P.; BIAVATI, G.; HORÁNYI, A.; MUÑOZ SABATER, J.; NICOLAS, J.; PEUBEY, C.; RADU, R.; ROZUM, I.; SCHEPERS, D.; SIMMONS, A.; SOCI, C.; DEE, D.; THÉPAUT, J-N. **ERA5 hourly data on pressure levels from 1979 to present**. Copernicus Climate Change Service (C3S). Disponível em: <https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/reanalysis-era5-pressure-levels?tab=overview>. Acesso em: 10 jul. 2020.

HONGYU, K.; SANDANIELO, V. L. M.; DE OLIVEIRA JUNIOR, G. J. Análise de componentes principais: resumo teórico, aplicação e interpretação. **E&S Engineering and Science**, v. 5, n. 1, p. 83-90, 2016.

HOUZE, R. A. Mesoscale convective systems. In: HOUZE, R. A. (Ed.). **Cloud dynamics**. [S.l.]: Academic Press, 1993. p.334-404.

HOUZE, R. A. Mesoscale convective systems. **Reviews of Geophysics**, v. 42, n. 4, 2004.

INSTITUTO BRASILEIRO. DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. **Censo demográfico de 2010**. Online. Disponível em: <http://www.sidra.ibge.gov.br/>.

INSTITUTO BRASILEIRO. DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. **Dados online**. 2018. Disponível em: <http://www.sidra.ibge.gov.br/>.

IG. ÚLTIMO SUGUNDO. **Duas grandes chuvas marcaram o Rio em 2010**. Disponível em: <<https://ultimosegundo.ig.com.br/brasil/rj/duas-grandes-chuvas-marcaram-o-rio-em-2010/n1237943580388.html>>. Acesso em: 05 maio 2019.

ISTO É. TERRA NOTÍCIAS. **SP tem 250 mais mortes causadas por temporais**. Disponível em: <<https://istoe.com.br/sp-tem-250-mais-mortes-causadas-por-temporais-chuva-na-capital-e-recorde/>>. Acesso em: 05 maio 2019.

KODAMA, Y.-M. Large-scale common features of sub-tropical convergence zones (the Baiu Frontal Zone, the SPCZ, and the SACZ) Part II: conditions of the circulations for generating the STCZs. **Journal of the Meteorological Society of Japan Serie II**, v. 71, n. 5, p. 581-610, 1993.

KODAMA, Y. Large-scale common features of subtropical precipitation zones (the Baiu frontal zone, the SPCZ, and the SACZ) Part I: characteristics of subtropical frontal zones. **Journal of the Meteorological Society of Japan Serie II**, v. 70, n. 4, p. 813-836, 1992.

KOUSKY, V. E. Pentad outgoing longwave radiation climatology for the South American sector. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 3, n. 1, p. 217-231, 1988.

LIMA, K. C.; SATYAMURTY, P.; FERNÁNDEZ, J. P. R. Episódios de precipitação (intensa/extrema) na região sudeste do Brasil: parte i—distribuições espacial, interanual e sazonal. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 15., 2008. **Anais...** 2008.

MADDOX, R. A. Mesoscale convective complexes. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 61, n. 11, p. 1374-1387, 1980.

MARCELINO, E. V. Desastres naturais e geotecnologias: conceitos básicos. **Caderno Didático**, n. 1, 2008.

MARENGO, J. A.; ALVES, L. M. The intense rainfall and floods in Rio de Janeiro. state of the climate in 2011. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 93, p. S176, 2012.

MARENGO, J. A.; ALVES, L. M.; AMBRIZZI, T.; YOUNG, A.; BARRETO, N.J.C.; RAMOS, A. M. Trends in extreme rainfall and hydrogeometeorological disasters in the Metropolitan Area of São Paulo: a review. **Annals of New York Academy of Sciences**, v. 1472, p.5-20, 2020.

MARTINS, G. A. **Estatística geral e aplicada**. 3.ed. São Paulo: Atlas, 2005. 424 p.

MELLO, Y. R.; OLIVEIRA, T. M. N.. Análise estatística e geoestatística da precipitação média para o município de Joinville (SC). **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 31, n. 2, p. 229-239, 2016.

MOLION, L. C. B. Climatologia dinâmica da região Amazônica: mecanismos de precipitação. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 2, n. 1, p. 107-117, 1987.

OLIVEIRA, P. T. **Estudo estatístico sobre eventos de precipitação intensa no nordeste do Brasil**. 114p. Tese (Doutorado em Ciências Climáticas) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2014.

PAZ, A. R.; COLLISCHONN, W. Avaliação de estimativas de campos de precipitação para modelagem hidrológica distribuída. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 26, n. 1, p. 109-120, 2011.

PRISTO, M. V. J. et al. Climatologia de chuvas intensas no município do Rio de Janeiro. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 33, n. 4, p. 615-630, 2018.

QUADRO, M. F. L. **Estudo de episódios de Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) sobre a América do Sul**. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 1994.

REBOITA, M. S. et al. Entendendo o tempo e o clima na América do Sul. **Terra e Didática**, v. 8, n. 1, p. 34-50, 2012.

REBOITA, M. S. et al. Regimes de precipitação na América do Sul: uma revisão bibliográfica. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 25, n. 2, 2010.

REGOTO, P. et al. Tendências de extremos de precipitação para o Estado do Espírito Santo. **Anuário do Instituto de Geociências**, v. 41, n. 1, p. 365-381, 2019.

SAKAMOTO, M. S. **Sistemas convectivos de mesoescala observados na Região Subtropical da América do Sul durante o SALLJEX**. Tese (Doutorado) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.

SALMI, T. et al. **Detecting trends of annual values of atmospheric pollutants by the Mann-Kendall test and Sen's slope estimates MAKESENS—The excel template application**. Helsinki: Finish Meteorological Institute, 2002.

SALVADOR, M. A.; SANTOS, L. S. F. C.. Análise da precipitação na cidade de São Paulo no período 1961-2009. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 7, 2010.

SANT'ANNA NETO, J. L. Decálogo da climatologia do sudeste brasileiro. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 1, n. 1, 2005.

SANTOS, M. J.; YNOUE, R. Y. Variabilidade espaço-temporal dos eventos extremos diários de precipitação para o estado de São Paulo. In: SIMPÓSIO INTERNACIONAL DE CLIMATOLOGIA, 4., 2011, João Pessoa, Paraíba. **Anais...** 2011. Disponível em: <<http://www.sbmet.org.br/sic2011/arq/12063945876301206394587.pdf> >. Acesso em: 25 abr. 2018.

SEGALIN, B. **Características dos sistemas convectivos de mesoescala nas simulações climáticas do RegCM4**. 2012. 119p. Tese (Doutorado) Universidade de São Paulo, São Paulo, 2012.

SENA, A. C. T. **Padrões de larga escala associados a eventos extremos de precipitação em São Paulo**. 120p. Dissertação (Mestrado) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2016

SILVA, W. L. et al. Future changes in temperature and precipitation extremes in the state of Rio de Janeiro (Brazil). **American Journal of Climate Change**, v. 3, n. 4, p. 353, 2014.

SILVA, W. L.; DERECZYNSKI, C. P. Caracterização climatológica e tendências observadas em extremos climáticos no estado do Rio de Janeiro. **Anuário do Instituto de Geociências**, v. 37, n. 2, p. 123-138, 2014.

SILVA, W. L.; DERECZYNSKI, C. Tendências observadas nos índices extremos diários de temperatura do ar e precipitação na Cidade do Rio de Janeiro. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 16., 2010, Belém, Brasil. **Anais...** 2010.

SONG, Y.; ACHBERGER, C.; LINDERHOLM, H. W. Rain-season trends in precipitation and their effect in different climate regions of China during 1961–2008. **Environmental Research Letters**, v. 6, n. 3, p. 034025, 2011.

TEIXEIRA, M. S.; SATYAMURTY, P. Trends in the frequency of intense precipitation events in southern and southeastern Brazil during 1960–2004. **Journal of climate**, v. 24, n. 7, p. 1913-1921, 2011.

TERRA NOTÍCIAS. **Permanece o alerta para chuva forte no Rio de Janeiro**. Disponível em: <<https://www.terra.com.br/noticias/climatempo/permanece-o-alerta-para-chuva-forte-no-rio-de-janeiro,04394a5acdbb7b4d2ddd0523ab4b2febcafkfd10.html>>. Acesso em: 09 maio 2019.

TOBIN, G. A; MONTZ, B. E. **Natural hazards**: explanation and integration. New York: The Guilford Press, 1997. 388p.

Torres, P. H. C. et al. ODS 13 – ação contra a mudança global do clima. In: FREY, K.; TORRES, P. H. C.; JACOBI, P. R.; RAMOS, R. F. (Ed.). **Objetivos do desenvolvimento sustentável**: desafios para o planejamento e a governança ambiental na Macrometrópole Paulista. Santo André: EdUFABC, 2020. Disponível em: <https://www.researchgate.net/profile/Edson_Grandisoli/publication/346920676_ODS_4_-_Educacao_de_Qualidade/links/5fd211d7299bf188d407b5d2/ODS-4-Educacao-de-Qualidade.pdf>. Acesso em: 15 dez. 2020.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA. CENTRO DE ESTUDOS E PESQUISAS EM ENGENHARIA E DEFESA CIVIL – UFSC-CEPED. **Atlas brasileiro de desastres naturais 1991 a 2012**. Florianópolis: CEPED UFSC, 2013.

UOL NOTÍCIAS. **Chuva Rio de Janeiro: mortos, temporal**. Disponível em: <<https://noticias.uol.com.br/cotidiano/ultimas-noticias/2019/04/09/chuva-rio-de-janeiro-mortos-temporal.htm>>. Acesso em: 05 maio 2019.

UOL NOTÍCIAS. **Chuva maior no Rio de Janeiro**. Disponível em: <<https://noticias.uol.com.br/cotidiano/ultimas-noticias/2019/04/09/chuvas-maior-rio-de-janeiro.htm>>. Acesso em: 05 maio 2019.

VARELLA, C. A. **A Análise de componentes principais**. Seropédica: Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, 2008.

VELASCO, I.; FRITSCH, J. M. Mesoscale convective complexes in the Americas. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 92, n. D8, p. 9591-9613, 1987.

VILLELA, F. **Chuva deixa região serrana do Rio em estado de alerta**. Agência Brasil, 2016. Disponível em: <<https://agenciabrasil.ebc.com.br/geral/noticia/2016-01/chuva-deixa-regiao-serrana-em-estado-de-alerta>>. Acesso em: 10 dez. 2020.

WILKS, D. S. **Statistical methods in the atmospheric sciences**. [S.l.]: Academic Press, 2011.

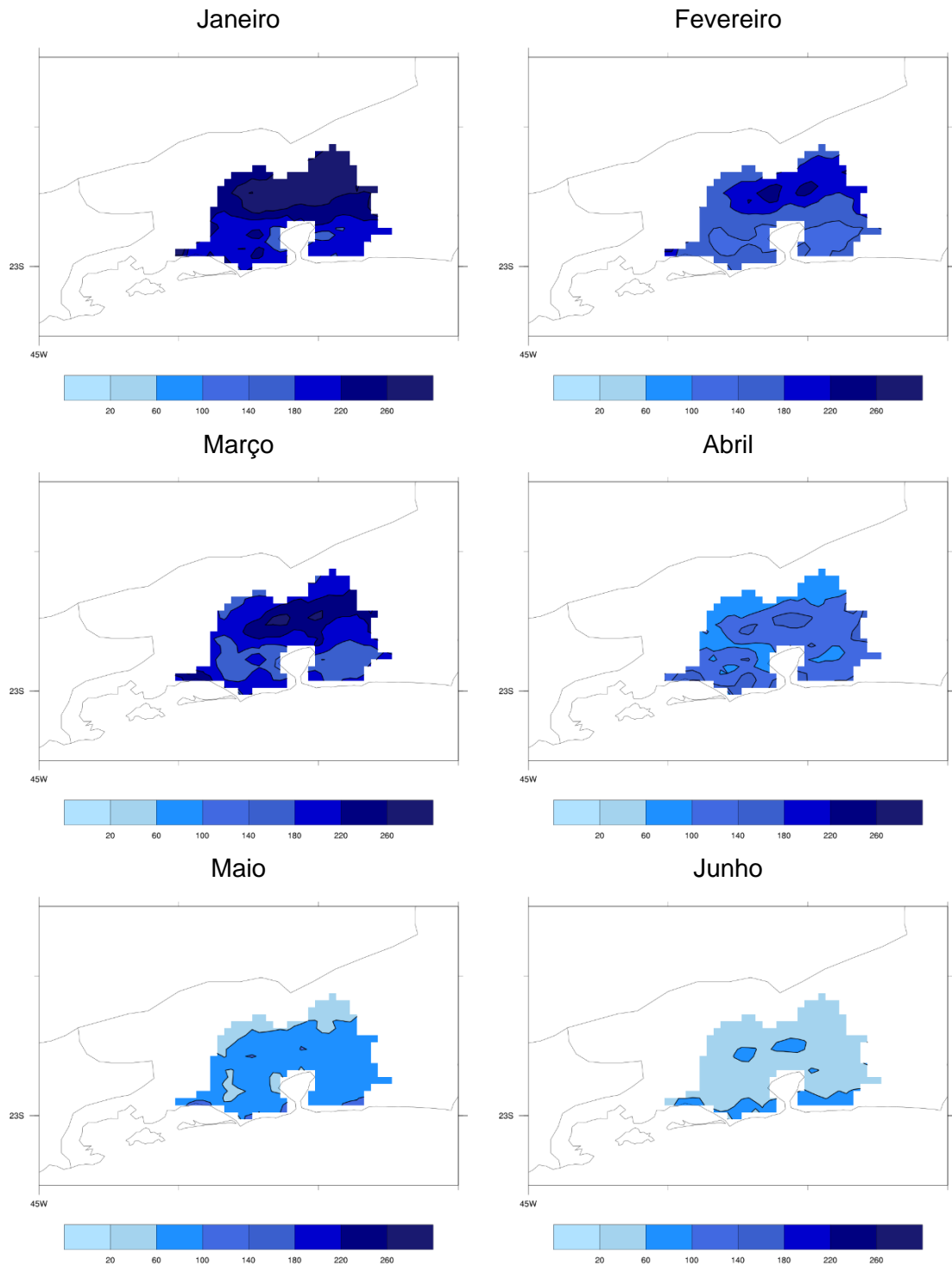
WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION (WMO). **Climate**. Disponível em: < <http://youth.wmo.int/what-we-do/climate>>. Acesso em 07 maio 2019.

XAVIER, T. M. B. S.; SILVA, J. F.; REBELLO, E. R. G. **A técnica dos quantis e suas aplicações em meteorologia, climatologia e hidrologia, com ênfase para as regiões brasileiras**. Brasília: Thesaurus, 2002, 141 p.

ZHOU, J; LAU, K. M. Does a monsoon climate exist over South America?. **Journal of Climate**, v. 11, n. 5, p. 1020-1040, 1998.

APÊNDICE A - CAMPOS DE MÉDIAS MENSAIS DE PRECIPITAÇÃO NA MESORREGIÃO METROPOLITANA DO RIO DE JANEIRO.

Figura A.1 – Médias mensais de precipitação (mm) na MMRJ, no período de 1985 a 2019.



(Continua)

Figura A.1 – Conclusão.

