

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE ASTRONOMIA, GEOFÍSICA E CIÊNCIAS ATMOSFÉRICAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO METEOROLOGIA

JOÃO PEDRO RODRIGUES DA SILVA

**Vórtices Ciclônicos de Mesoescala embebidos na Zona de Convergência do
Atlântico Sul associados a Desastres Naturais no estado de São Paulo**

São Paulo
2022

JOÃO PEDRO RODRIGUES DA SILVA

Vórtices Ciclônicos de Mesoescala embebidos na Zona de Convergência do Atlântico Sul associados a Desastres Naturais em São Paulo

Dissertação apresentada ao Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Mestre em Meteorologia pelo Programa de Pós-graduação em Meteorologia.

Área de Concentração: Meteorologia

Orientador: Profa. Dra. Rita Yuri Ynoue

Versão Corrigida. O original encontra-se disponível na Unidade.

São Paulo
2022

Agradecimentos

A Prof. Dra. Rita Yuri Ynoue, pela orientação, incentivo e discussões construtivas em todo o período de desenvolvimento da dissertação, ainda que boa parte de forma remota, sempre esteve de prontidão para quaisquer dúvidas, me ensinando e me tornando um profissional mais capacitado. Agradeço a confiança colocada em mim para a realização desse trabalho.

Ao Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas (IAG), em especial aos professores do Departamento de Ciências Atmosféricas, pelas valiosas disciplinas e discussões que contribuíram com o trabalho e aos meus colegas do instituto, que tornaram meus dias mais leves e divertidos com a presença de vocês.

A Ana Clara, minha namorada, minha maior incentivadora, por todo seu companheirismo, amor, conversas e paciência, me ajudando nos momentos em que mais preciso dela. A meu pai, José, minha mãe, Maria e meus irmãos Lucas e Victor, que contribuíram com todo suporte à minha formação para conseguir alcançar meus sonhos e objetivos.

A todos da empresa onde trabalho, Mérito Energia, em especial ao Mario por toda ajuda e compreensão nesse ano em que estive conciliando o mestrado com o emprego.

O presente trabalho foi realizado com o apoio financeiro do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq).

Resumo

SILVA, J.;P.;R.; **Vórtices Ciclônicos de Mesoescala embebidos na Zona de Convergência do Atlântico Sul associados a Desastres Naturais em São Paulo. 2022. 83f.** Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2022.

Os desastres naturais (DNs) têm sido observados com mais frequência e com intensidades cada vez maiores no Brasil, onde, as maiores ocorrências se concentram na região Sudeste, destacados principalmente por eventos de precipitações, inundações e deslizamentos de terra. Os DNs podem estar associado a Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS), mas apesar da ZCAS ser identificada como responsável pelos DNs, nota-se que intensas precipitações não ocorrem por toda a sua extensão, mas estão restritas a algumas localidades dentro da banda de nebulosidade que a define. Percebe-se, portanto, que para a compreensão dos fenômenos que levam a chuvas mais intensas, é necessário analisar o que ocorre na mesoescala. Desta maneira, o objetivo deste estudo é analisar ocorrências de vórtices ciclônicos de mesoescala (VCME) em eventos de ZCAS que estiveram associados aos DNs no estado de São Paulo nos anos de 2013 a 2017 utilizando dados da Reanálise ERA5, bem como analisar dois estudos de caso. Para contabilizar os eventos de ZCAS foram utilizadas cartas sinóticas de superfície, dados de precipitação das redes do Departamento de Água e Energia Elétrica (DAEE) e do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), bem como estimativas do *Climate Hazards group Infrared Precipitation with Stations* (CHIRPS). Para os eventos de DNs foi utilizado o banco de dados do Sistema Integrado de Informações sobre Desastres (S2ID) e para identificar os VCME foi adaptada a metodologia utilizada por Quadro (2012). Os resultados obtidos destacam 62 eventos de ZCAS, dos quais 28 estiveram associados a DNs, e, destes, 10 apresentaram VCME. Os VCME foram separados em dois grupos: 1) VCMEs nos eventos de ZCAS que apresentaram precipitação no local dos VCME e DNs e 2) VCMEs nos eventos de ZCAS que não apresentaram precipitação no local dos VCME e DNs. Os eventos do grupo 1 se caracterizaram por convergência em baixos níveis e divergência em altos níveis da atmosfera; valores de vorticidade inferiores a $-8 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ predominantes em baixos níveis (850 – 900 hPa), demonstrando uma relação com os maiores acumulados de precipitação e possivelmente com a ocorrência de DNs. Nos eventos do grupo 2, foram observados uma predominância dos valores negativos de vorticidade em médios e altos níveis, a falta de um padrão no campo de divergência nos níveis atmosféricos, bem como menores valores no acumulado de precipitação se comparado com os eventos do grupo 1. O primeiro estudo de caso foi o de 11 a 15 de janeiro de 2016, associado a DNs em 8 cidades. Os maiores acumulados de precipitação e as maiores atividades convectivas foram observados nos dias 13 e 14, quando houve a atuação de um Sistema Convectivo de Mesoescala e posteriormente a atuação de um VCME com mínimo de vorticidade relativa nos níveis de 850 hPa. O VCME esteve acoplado verticalmente na atmosfera e a precipitação associada a ele representou mais de 37% de toda a precipitação do evento de ZCAS, sendo possível atribuir ao VCME uma contribuição na ocorrência dos DNs ocasionados por precipitação. O segundo evento de ZCAS foi de dia 09 a 15 de março de 2015, associado a menores acumulados de precipitação observada e apenas 1 cidade afetada com DNs. Apesar da ZCAS ter atuado desde o dia 09, somente a partir do dia 14 foi observado VCME. Os maiores acumulados de precipitação não estiveram associados diretamente a atuação do VCME, destacando-se que quando o VCME atua em níveis mais altos da atmosfera não foi observada uma relação com a precipitação em superfície. A precipitação associada ao VCME representou aproximadamente 18% da precipitação de todo o evento sobre o oeste do estado de São Paulo. Por atuar em dias diferentes, pode-se afirmar que o VCME não apresentou relação com o DN.

Palavras-chave: ZCAS, Vórtice Ciclônicos de Mesoescala, Precipitação, Desastres Naturais.

Abstract

SILVA, J.;P.;R.; **Mesoscale Cyclonic Vortices embedded in the South Atlantic Convergence Zone associated with Natural Disasters in São Paulo. 2022 83p.** Dissertation (Master of Meteorology) – Institute of Astronomy, Geophysics and Atmospheric Science, University of São Paulo, São Paulo, 2021.

Natural disasters (NDs) have been observed more frequently and with increasing intensities in Brazil, where the highest occurrences are concentrated in the Southeast region, highlighted mainly by precipitation events, floods and landslides. The NDs may be associated with the South Atlantic Convergence Zone (SACZ), but despite the SACZ being identified as responsible for the NDs, it is noted that intense rainfall does not occur along its entire length but is restricted to some locations within the band. of cloudiness that defines it. It can be seen, therefore, that to understand the phenomena that lead to more intense rains, it is necessary to analyze what occurs at the mesoscale. Thus, the objective of this study is to analyze occurrences of mesoscale cyclonic vortices (MCV) in SACZ events that were associated with NDs in the state of São Paulo from 2013 to 2017 using data from the ERA5 Reanalysis, as well as to analyze two case studies. To account for SACZ events, surface synoptic charts, precipitation data from the Department of Water and Electricity (DAEE) and National Meteorological Institute (INMET) networks were used, as well as estimates from the Climate Hazards group Infrared Precipitation with Stations (CHIRPS). For ND events, the Integrated Disaster Information System (S2ID) database was used, and the methodology used by Quadro (2012) was adapted to identify MCV. The results showed 62 SACZ events, of which 28 were associated with NDs, and, of these, 10 presented MCV. The MCVs were separated into two groups: 1) MCVs in the SACZ events that showed precipitation at the location of the MCV and NDs and 2) MCVs in the SACZ events that did not show precipitation at the location of the MCV and NDs. Group 1 events were characterized by convergence at low levels and divergence at high levels of the atmosphere; vorticity values lower than $-8 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ predominating at low levels (850–900 hPa), demonstrating a relationship with the highest precipitation accumulations and possibly with the occurrence of NDs. In the events of group 2, there was a predominance of negative values of vorticity in medium and high levels, the lack of a pattern in the field of divergence in the atmospheric levels, as well as lower values in the accumulated precipitation compared to the events of group 1. The first case study was from January 11 to 15, 2016, associated with NDs in 8 cities. The highest precipitation accumulations and the highest convective activities were observed on the 13th and 14th when a Mesoscale Convective System acted and later a MCV appeared with minimum relative vorticity at 850 hPa levels. The MCV was vertically coupled in the atmosphere and the precipitation associated with it represented more than 37% of all the precipitation of the SACZ event, making it possible to attribute to the MCV a contribution in the occurrence of NDs caused by precipitation. The second SACZ event was from March 09 to 15, 2015, associated with lower observed precipitation accumulations and only 1 city affected with ND. Although the SACZ has acted since the 9th, the MCV was only observed after the 14th. The highest precipitation accumulations were not directly associated with the the MCV, indicating that when the MCV acts at higher levels of the atmosphere, a relationship with surface precipitation was not observed. The precipitation associated with MCV represented approximately 18% of the entire event precipitation over western São Paulo state. As it operates on different days, it can be said that the MCV had no relationship with the ND.

Keywords: SACZ, Mesoscale Cyclonic Vortex, Precipitation, Natural Disasters

Lista de Figuras

Figura 1 – Topografia (m) do Estado de São Paulo.....	13
Figura 2 – Climatologia anual de precipitação (mm) do estado de São Paulo CHIRPS (1981 – 2010).....	13
Figura 3 - Tipos de desastres naturais ocorridos no Brasil e regiões de ocorrência. Onde: IN – Inundação, ES – Escorregamento, TE – Tempestades, SE – Seca, TX – Temperatura Extrema, IF – Incêndio Florestal e TR – Terremoto.....	19
Figura 4 - Características da ZCAS em baixos, médios e altos níveis	21
Figura 5 - Estações Pluviométricas do DAEE e estações meteorológicas INMET.....	28
Figura 6 - Duração (horas) dos VCME nos níveis verticais: a)250hPa; b)500hPa; c)700hPa e d)850hPa	35
Figura 7 – Perfis verticais de vorticidade relativa ($10^{-4} s^{-1}$, colorido) e ômega ($Pa s^{-1}$, linhas em preto, valores negativos em linhas tracejadas) no centro do VCME nos casos a) ZCAS 1, b) ZCAS 18, c) ZCAS 41 e d) ZCAS 52. (Escala de cores diferentes para cada evento).....	39
Figura 8 - Perfis verticais de divergência ($10^{-4} s^{-1}$, colorido) e ômega ($Pa s^{-1}$, linhas em preto, valores negativos em linhas tracejadas) no centro do VCME nos casos a) ZCAS 1, b) ZCAS 18, c) ZCAS 41 e d) ZCAS 52. (Escala de cores diferentes para cada evento).....	40
Figura 9 - Perfis verticais de vorticidade relativa ($10^{-4} s^{-1}$, colorido) e ômega ($Pa s^{-1}$, linhas em pretos, valores negativos em linhas tracejadas) nos casos a) ZCAS 3, b) ZCAS 13, c) ZCAS 35, d) ZCAS 36, e) ZCAS 51 e f) ZCAS 54. (Escala de cor diferentes para cada evento).....	41
Figura 10 - Perfis verticais de divergência ($10^{-4} s^{-1}$, colorido) e ômega ($Pa s^{-1}$, linhas em pretos, valores negativos em linhas tracejadas) nos casos a) ZCAS 3, b) ZCAS 13, c) ZCAS 35, d) ZCAS 36, e) ZCAS 51 e f) ZCAS 54. (Escala diferentes para cada evento).....	42
Figura 11 - Campos Sinóticos. a), e), i), m) Pressão a nível médio do mar (hPa, linhas contínuas em preto), Espessura da camada entre 500 e 1000 hPa (dam, linhas tracejadas em azul e vermelho) e magnitude do vento em 250 hPa (m/s, colorido); b), f), j), n) Umidade Específica ($g kg^{-1}$, colorido) e vetores do vento ($m s^{-1}$) em 850 hPa; c), g), k) o) Omega ($Pa s^{-1}$, colorido), altura geopotencial (m, linhas vermelhas) e linhas de corrente em 500 hPa; d), h), l) , p) Divergência ($10^{-5} s^{-1}$,	

colorido) e linhas de corrente em 250 hPa às 00Z para os dias 12, 13, 14 e 15 de janeiro de 2016.	44
Figura 12 – Imagens do Canal do Infravermelho do Satélite GOES – 13 para os dias 12, 13, 14 e 15 de janeiro de 2016 nos horários da 00Z (a, d, g, j) e 12Z (b, e, h, k), respectivamente, e a precipitação acumulada (mm) do programa CHIRPS nos mesmos dias (c, f, i, l).	46
Figura 13 - Imagens do Canal do Infravermelho do Satélite GOES – 13 para os dias: a) 12 às 22Z; b) 13 às 02Z; c) 13 às 10Z; d) 14 às 04Z; e) 14 às 06Z; f) 14 às 08Z.	47
Figura 14 - Campos Sinóticos. a) Umidade Específica (g kg^{-1} , colorido) e vetores do vento (m s^{-1}) em 850 hPa; b) Omega (Pa s^{-1} , colorido), altura geopotencial (m, linhas em vermelho) e linhas de corrente (linhas em preto) em 500 hPa c) Divergência (10^{-5} s^{-1} , colorido) e linhas de corrente em 250 hPa para o dia 14 de janeiro de 2016 às 04 Z.	48
Figura 15 - Vorticidade Relativa (10^{-4} s^{-1} , colorido) e linhas de corrente em: a) 850 hPa no dia 13 às 10Z; b) 850 hPa no dia 13 às 13Z; c) 850 hPa no dia 14 às 00Z; d) 850 hPa no dia 14 às 04Z; e) 850 hPa no dia 14 às 08Z; f) 850 hPa no dia 14 às 10Z; g) 850 hPa no dia 14 às 16Z; h) 850 hPa no dia 14 às 19Z; i) 850 hPa no dia 15 às 01Z; j) 850 hPa no dia 15 às 07Z; k) 850 hPa no dia 15 às 14Z; l) 850 hPa no dia 15 às 19Z de janeiro de 2016	49
Figura 16 - Acumulado de precipitação durante o evento de ZCAS (11 - 15 de janeiro de 2016) nos conjuntos: a) Precipitação diária do INMET (marcados como quadrados) e Precipitação diária do DAEE (marcados como círculos); b) Precipitação diária do CHIRPS. Os triângulos vermelhos em a) identificam os locais com DNs.....	50
Figura 17 – Campos Sinóticos. A), e), i), m) Pressão a nível médio do mar (hPa, linhas contínuas em preto), Espessura da camada entre 500 e 1000 hPa (Dam, linhas tracejadas em azul e vermelho) e magnitude do vento em 250 hPa (m/s , colorido); b), f), j), n) (Umidade Específica (g kg^{-1} , colorido) e vetores do vento (m s^{-1}) em 850 hPa; c), g), k) o) Omega (Pa s^{-1} , colorido), altura geopotencial (m, linhas vermelhas) e linhas de corrente em 500 hPa; d), h), l) , p) Divergência (10^{-5} s^{-1} , colorido) e linhas de corrente em 250 hPa às 00Z para os dias 12, 13, 14 e 15 de março de 2015.	52
Figura 18 – Imagens do Canal do Infravermelho do Satélite GOES – 13 para os dias 12, 13, 14 e 15 de janeiro de 2016 nos horários da 00Z (a, d, g, j) e 12Z (b, e, h, k),	

respectivamente, e a precipitação acumulada (mm) do programa CHIRPS nos mesmos dias (c, f, i, l).....	54
Figura 19 - Imagens do Canal do Infravermelho do Satélite GOES – 13 para os dias: a) 14 às 12Z; b)14 às 15Z; c) 14 às 18Z; d) 14 às 20Z; e) 15 às 01Z; f) 15 às 04Z.	55
Figura 20 - Campos Sinóticos. a) Umidade Específica (g kg^{-1} , colorido) e vetores do vento (m s^{-1}) em 850 hPa; b) Omega (Pa s^{-1} , colorido), altura geopotencial (m, linhas em vermelho) e linhas de corrente (linhas em preto) em 500 hPa c) Divergência (10^{-5} s^{-1} , colorido) e linhas de corrente em 250 hPa para o dia 14 de janeiro de 2016 às 18Z.....	55
Figura 21 - Vorticidade Relativa (10^{-4} s^{-1} , colorido) e linhas de corrente em: a) 250 hPa no dia 14 às 07Z; b) 250 hPa no dia 14 às 12Z; c) 250 hPa no dia 14 às 18Z; d) 250 hPa no dia 15 às 00Z; e) 250 hPa no dia 15 às 05Z; f) 250 hPa no dia 15 às 10Z; g) 250 hPa no dia 15 às 12Z; h) 250 hPa no dia 15 às 15Z; i) 250 hPa no dia 15 às 17Z; j) 250 hPa no dia 15 às 19Z; k) 250 hPa no dia 15 às 21Z; l) 250 hPa no dia 15 às 23Z de janeiro de 2013	56
Figura 22 - Acumulado de precipitação durante o evento de ZCAS (09 - 15 de março de 2015) nos conjuntos: a) Precipitação diária do INMET (marcados como quadrados) e Precipitação diária do DAEE (marcados como círculos); b) Precipitação diária do CHIRPS. Os triângulos vermelhos em a) identificam os locais com DN's	57

Lista de tabelas

Tabela 1 - Datas dos eventos de ZCAS no período de 2013 – 2017 indicando eventos de DN's e VCMEs. Em destaque os eventos que serão abordados neste estudo.....	32
Tabela 2 - Características dos DN's fornecidos pelo S2ID nos eventos de ZCAS+DN+VCME. *Indica dados faltantes.....	33
Tabela 3 – Número de eventos analisados e porcentagem correspondente	33
Tabela 4 – Eventos de ZCAS com VCME e com desastres naturais (ZCAS+DN+VCME) ...	33
Tabela 5 - Eventos de ZCAS com VCME e sem desastres naturais (ZCAS-DN+VCME)	34
Tabela 6 – Características da localização dos VCMEs nos 10 eventos de ZCAS+DN+VCME e a precipitação acumulada no período da ZCAS. *Indica dados faltantes. ** Precipitação esteve associada ao VCME, porém foi observada a presença de um SCM que contribuiu com a precipitação.....	36
Tabela 7 - Características meteorológicas dos VCMEs nos eventos de ZCAS que apresentaram precipitação no local dos VCME e DN's. *Indica que não houve VCME nesse nível e **Indica que não foi possível identificar o raio do VCME devido ao seu formato mais alongado.....	37
Tabela 8 - Características meteorológicas dos VCMEs nos eventos de ZCAS que não apresentaram precipitação no local dos VCME e DN's. *Indica que não houve VCME nesse nível e **Indica que não foi possível identificar o raio do VCME devido ao seu formato mais alongado.....	38

Lista de abreviaturas e siglas

AB	Alta da Bolívia
AS	América do Sul
ASAS	Anticiclone Subtropical do Atlântico Sul
CCM	Complexos Convectivos de Mesoescala
CHIRPS	<i>Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station data</i>
COBRADE	Classificação e Codificação Brasileira de Desastres
DAEE	Departamento de Águas e Energia Elétrica
DNs	Desastres Naturais
EM-DAT	<i>Emergency Events Database</i>
HL	Hora local
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
JBN	Jato de Baixos Níveis
MSA	Monção Sul-Americana
NOAA	<i>National Oceanic and Atmospheric Administration</i>
ONU	Organização das Nações Unidas
ROL	Radiação de Onda Longa
SCM	Sistema Convectivo de Mesoescala
S2ID	Sistema Integrado de Informações sobre Desastres
VCAN	Vórtices Ciclônicos de Altos Níveis
VCME	Vórtice Ciclônico de Mesoescala
ZCAS	Zona de Convergência do Atlântico Sul

Lista de símbolos

ζ	Vorticidade Relativa (s^{-1})
θ_0	Temperatura potencial

Sumário

1	Introdução	12
2	Objetivos	15
3	Revisão Bibliográfica	16
3.1	<i>Desastres Naturais no Brasil</i>	16
3.2	<i>Zona de Convergência do Atlântico Sul</i>	19
3.3	<i>Vórtices Ciclônicos de Mesoescala</i>	24
4	Materiais e Métodos	27
4.1	<i>Região e Período de Estudo</i>	27
4.2	<i>Coleta de dados sobre os Desastres Naturais</i>	27
4.3	<i>Dados Observados de Precipitação</i>	27
4.4	<i>Identificação da ZCAS</i>	29
4.5	<i>Identificação do Vórtice Ciclônico de Mesoescala através de um algoritmo</i>	30
5	Resultados	31
5.1	<i>Contagem e análise dos eventos de ZCAS, Desastres Naturais e Vórtices Ciclônicos de Mesoescala</i>	31
5.2	<i>Estudo de caso do evento de ZCAS 41</i>	43
5.3	<i>Estudo de caso do evento de ZCAS 35</i>	51
6	Conclusões	59
6.1	<i>Considerações Finais</i>	59
6.2	<i>Sugestão para trabalhos futuros</i>	61
7	Referências	63
	Apêndice A - Figuras referentes a todos os casos de ZCAS analisados no estudo	68

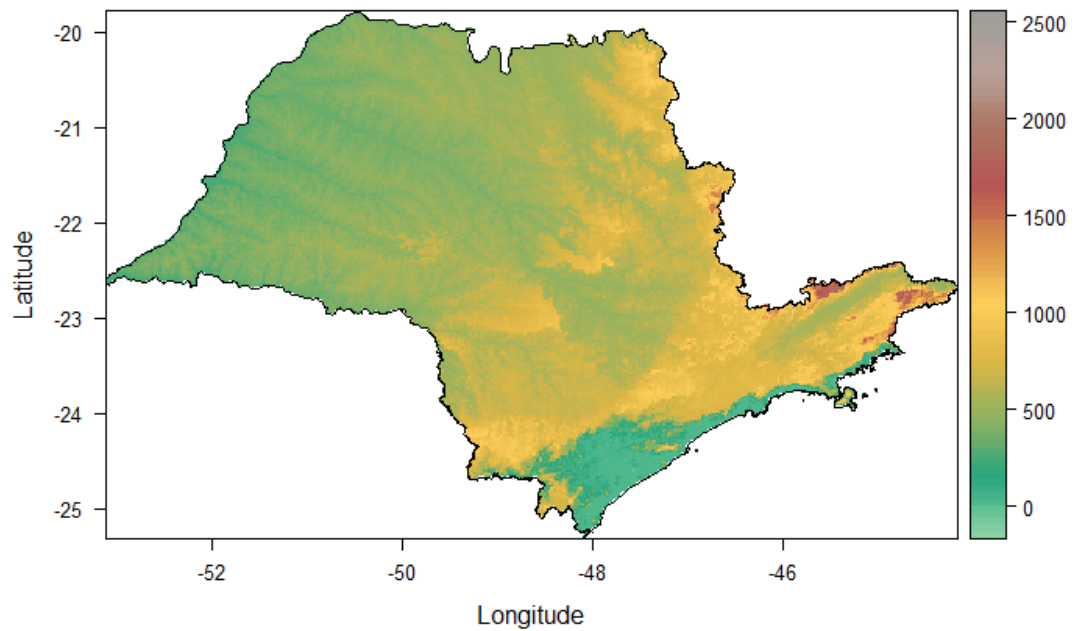
1 Introdução

A precipitação está entre as variáveis meteorológicas que mais impactam nas atividades humanas e na sociedade. Sua escassez afeta diretamente setores como: produção agrícola, geração de energia elétrica, abastecimento de cidades. Já o seu excesso é responsável por grande parte dos desastres naturais (DNs) como inundações, escorregamentos de encostas e barreiras, tempestades, causando danos em infraestruturas e até perdas de vida humana (SOUZA et al., 2012). Segundo Marcelino (2008), no Brasil, a maior parte dos DNs são desencadeados por fenômenos meteorológicos e hidrológicos, sendo os eventos extremos de chuva os principais causadores de inundações intensas e escorregamentos. Nota-se, por isso, um crescente interesse em estudos de sistemas meteorológicos que estão associados a esses eventos extremos, bem como seus impactos, principalmente em regiões com maiores riscos e consideradas mais vulneráveis, a fim de avançar nas prevenções e mitigações de desastres.

O Brasil é conhecido por sua grande extensão latitudinal e longitudinal e, portanto, é afetado por fenômenos meteorológicos de atuação tropical e subtropical. O estado de São Paulo, região de estudo deste trabalho, localiza-se na região Sudeste do Brasil e é constituído por serras, planaltos e planícies. As menores altitudes são observadas nas regiões litorâneas (Figura 1), a qual é cercada pela Serra do Mar, e as maiores altitudes são encontradas na Serra da Mantiqueira com valores próximos e até superiores a 2000 m. Essas características do relevo favorecem o levantamento de ar úmido e conseqüentemente o aumento da convecção contribuindo para as precipitações locais na região (BRASILIANSE, 2016).

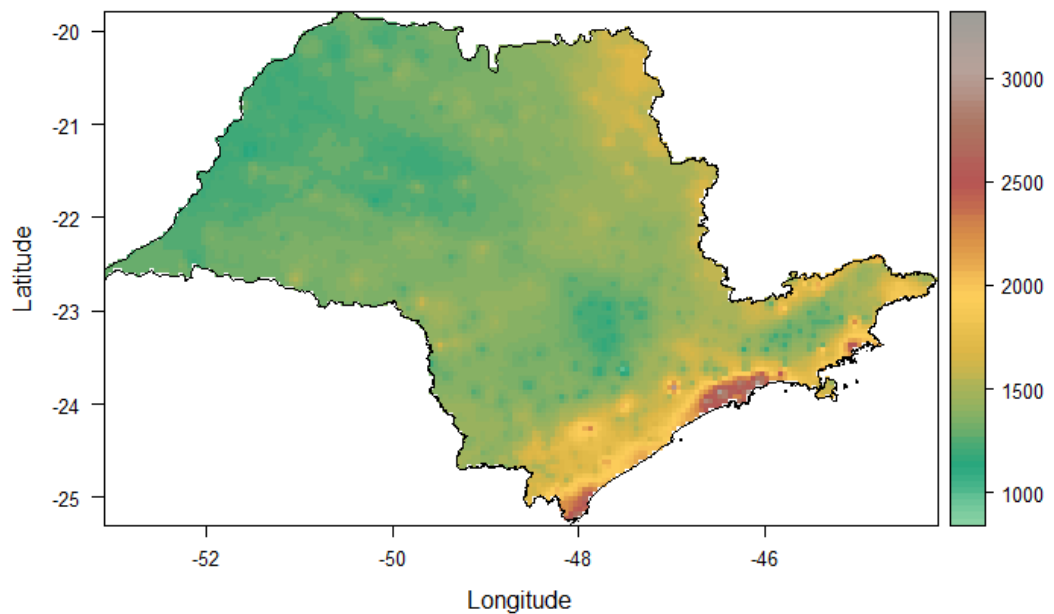
Ruy Lemes et al. (2019) apresentou alguns aspectos fisiográficos do estado de São Paulo em termos de relevo e vegetação a fim de mostrar associação com a distribuição espacial da precipitação. Os autores destacam que as áreas que apresentam pouca vegetação, seja ela arbórea, ou rasteira, são áreas com menores totais anuais de precipitação, como a região oeste do estado. Já as áreas mais próximas ao litoral têm suprimento de umidade proveniente do oceano. Ainda é destacada a importância das áreas mais vegetadas como a Mata Atlântica para os regimes de precipitação, especialmente durante o verão, época que as chuvas convectivas dependem também da umidade local (Figura 2).

Figura 1 – Topografia (m) do Estado de São Paulo



Fonte: João Pedro Rodrigues da Silva, 2022

Figura 2 – Climatologia anual de precipitação (mm) do estado de São Paulo CHIRPS (1981 – 2010)



Fonte: João Pedro Rodrigues da Silva, 2022.

De acordo com Reboita et al. (2010), a precipitação na região Sudeste da América do Sul e conseqüentemente Sudeste do Brasil pode estar associada com diversos sistemas atmosféricos, como a passagem de sistemas frontais (SILVA et al., 2014); circulação de brisas (PEREIRA FILHO et al., 2002); convecção por aquecimento radiativo da superfície; transporte

de umidade do oceano para o continente através do Anticiclone Subtropical do Atlântico Sul, transporte de umidade da região Amazônica para o Sudeste da América do Sul pelo Jato de Baixos Níveis (JBN, MARENGO et al.,2004), fatores estes que favorecem a formação e caracterização da Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) (KODAMA, 1992). Além disso, em uma escala espacial menor, Quadro (2012) identificou Vórtices Ciclônicos de Mesoescala (VCME) embebidos na banda de nebulosidade da ZCAS, sendo responsáveis por elevados acumulados de precipitação na região onde atuam.

Na literatura são abordados estudos dos VCMEs geralmente associados a eventos de sistemas convectivos de mesoescala, assim, ainda há um déficit de estudos dos VCMEs embebidos em Zonas de Convergência, desta maneira essa análise torna-se muito importante e, por ser uma região de grande relevância econômica e social, e em consequência do histórico de desastres naturais causados por eventos extremos de precipitação, o estado de São Paulo foi escolhido.

Na seção seguinte são apresentados os objetivos deste trabalho (seção 2), e, em seguida, uma breve revisão bibliográfica sobre desastres naturais, Zona de Convergência do Atlântico Sul e Vórtices Ciclônicos de Mesoescala (seção 3). A região e período de estudo, bem como a metodologia e os dados utilizados neste trabalho são expostos na seção 4. Na seção 5 é abordada a análise dos 10 eventos vórtices ciclônicos associados a ZCAS concomitantes com DNs e a discussão de dois estudos de caso ocorridos em março de 2015 e janeiro de 2016 e a última seção é finalizada com as conclusões.

2 Objetivos

Diante do exposto, o objetivo deste estudo é analisar a ocorrência de eventos de VCME embebidos na ZCAS que ocorreram no estado de São Paulo entre os anos de 2013 e 2017.

Os objetivos específicos deste trabalho são:

- i. Identificar os casos de ZCAS, VCMEs e DNs entre os anos de 2013 e 2017;
- ii. Avaliar cada caso em que houve ou não a ocorrência simultânea de ZCAS, DN e VCME;
- iii. Análise de dois estudos de caso: Um evento de VCME associado a DNs no estado de São Paulo (11 a 15 de janeiro de 2016) e um evento de VCME não associado a DNs no estado de São Paulo (09 a 15 de março de 2015)

3 Revisão Bibliográfica

3.1 *Desastres Naturais no Brasil*

De acordo com o Glossário da Defesa Civil Nacional, desastre é tratado como sendo resultado de eventos adversos, naturais ou provocados pelo homem, sobre um ecossistema vulnerável, causando danos humanos, materiais e/ou ambientais e consequentes prejuízos econômicos e sociais. A intensidade de um desastre depende da interação entre a magnitude do evento adverso e o grau de vulnerabilidade do sistema receptor afetado (CASTRO, 1998).

Castro (1998) classifica os desastres quanto à intensidade e à origem. Quanto à intensidade a divisão é feita em níveis:

- Nível I – Os desastres de pequena intensidade são caracterizados quando os danos causados são pouco importantes e os prejuízos correspondem a menos de 5% do PIB municipal. Desta maneira, tais prejuízos são mais facilmente suportáveis e superáveis pelas comunidades afetadas e a situação de normalidade é facilmente restabelecida com os recursos existentes e disponíveis na área afetada e sem necessidade de grandes mobilizações.

- Nível II – Os desastres de média intensidade são caracterizados quando os danos causados são de alguma importância e os prejuízos correspondem entre 5% e 10% do PIB municipal. Apesar disto, esses desastres são suportáveis e superáveis por comunidades bem-informadas, preparadas, participativas e facilmente mobilizáveis. Nessas condições, a situação de normalidade pode ser restabelecida com os recursos existentes e disponíveis na área afetada, desde que sejam racionalmente mobilizados e judiciosamente utilizados.

- Nível III - Os desastres de grande porte são caracterizados quando os danos causados são importantes e os prejuízos correspondem entre 10% e 30% do PIB municipal. Apesar disso, esses desastres são suportáveis e superáveis por comunidades bem-informadas, preparadas, participativas e facilmente mobilizáveis. Nessas condições, a situação de normalidade pode ser restabelecida, desde que os recursos mobilizados na área (município) afetada sejam reforçados com o aporte de recursos estaduais e federais já disponíveis.

- Nível IV - Os desastres de muito grande porte (intensidade) são caracterizados quando os danos causados são muito importantes e os prejuízos são maiores que 30% do PIB municipal. Nessas condições, esses desastres não são superáveis e suportáveis pelas comunidades, mesmo quando bem-informadas, preparadas, participativas e facilmente mobilizáveis, a menos que recebam ajuda de fora da área afetada. Nessas condições, o

restabelecimento da situação de normalidade depende da mobilização e da ação coordenada dos três níveis do Sistema Nacional de Defesa Civil — SINDEC e, em alguns casos, de ajuda internacional.

E quanto à origem os desastres são divididos em:

- Naturais: São aqueles provocados por fenômenos e desequilíbrios da natureza e produzidos por fatores de origem externa que atuam independentemente da ação humana.
- Humanos: São aqueles provocados por ações ou omissões humanas. Relacionam-se com o próprio homem, enquanto agente e autor. Por isso, são produzidos por fatores de origem interna. Esses desastres podem produzir situações capazes de gerar grandes danos à natureza, aos habitats humanos e ao próprio homem, enquanto espécie
- Mistos: Ocorrem quando as ações ou omissões humanas contribuem para intensificar, complicar e/ou agravar desastres naturais

Marcelino (2008) destaca que, em se considerando somente o critério de classificação dos desastres quanto à origem, a maioria dos desastres conhecidos como naturais, seriam desastres mistos, uma vez que o foco de análise não deveria estar no processo e sim no fenômeno desencadeador, ou seja, aquele que dispara o processo. Por mais que um corte na encosta para a construção de uma casa aumente o risco de escorregamento, ele só ocorrerá quando disparado por fortes chuvas. Caso for desencadeado por depósitos de lixo, aterros em encostas ou vazamentos de água e esgoto, este desastre deveria ser classificado como humano. Foi a ação direta do homem que resultou no disparo, apesar da susceptibilidade própria da encosta.

A ocupação e intervenção humana em áreas de perigo geológico potencializam a ocorrência de desastres. O dano ocasionado pelos desastres é calculado pelo número de pessoas e pelo valor das propriedades e bens que estão em risco, bem como pela interrupção das atividades econômicas e pelos danos ambientais (CEA, 2014).

Segundo a Classificação e Codificação Brasileira de Desastres (COBRADE, 2012) para que um evento seja considerado desastre, é necessário que pelo menos um dos seguintes critérios descritos aconteça: ocorrência de desabrigados e/ou desalojados, eventos de deslizamentos de terra ou transbordamento de rios (com ou sem vítimas), declaração de emergência ou declaração de situação de calamidade pública e mortes.

Dados do Emergency Events Database (EM-DAT, 2007) reportaram o registro de 150 DN's no período de 1900 – 2006, sendo importante destacar que esse banco de dados leva em consideração somente eventos em que houve a ocorrência de: a) 10 ou mais vítimas fatais; b) 100 ou mais pessoas afetadas; c) declaração de estado de emergência; e d) pedido de assistência

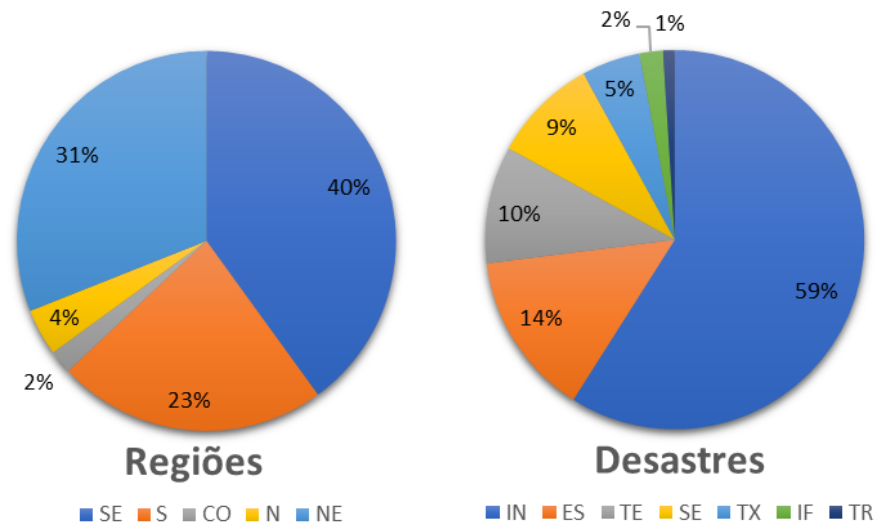
internacional. Assim, o número de DN's no Brasil é bem maior do que os contabilizados pelo EM-DAT. Marcelino et al. (2006) destaca alguns números contabilizados no período de 1980 a 2003, no estado de Santa Catarina com a ocorrência de 3373 desastres naturais e no período de 1980 a 2006, no estado do Paraná com a ocorrência de 2553 desastres naturais, sendo importante enfatizar que 85% dos desastres também foram causados pelas instabilidades atmosféricas severas. É importante frisar que os desastres documentados na Defesa Civil são aqueles em que foram decretados situação de emergência e estado de calamidade pública pelos municípios afetados. No total de DN's contabilizados pelo EM-DAT, foram registrados 8.183 vítimas fatais e um prejuízo estimado em bilhões de dólares, sendo que 84% de todos os desastres foram computados a partir da década de 70. Souza (2011) complementa que, de acordo com relatório da ONU, o Brasil foi atingido por 60 desastres naturais entre 2000 e 2010, deixando 7,5 milhões de brasileiros sem casas e 1,2 mil mortos, com prejuízos econômicos, físicos e psicológicos.

O Glossário da Defesa Civil Nacional (CASTRO, 1998) define os desastres naturais causados por instabilidades atmosféricas:

- Enchente: Elevação do nível de água de um canal de drenagem devido ao aumento da vazão, atingindo a cota máxima do canal, porém, sem extravasar;
- Inundação: Transbordamento de água da calha normal de rios, mares, lagos e açudes, atingindo áreas ao entorno;
- Alagamento: Água acumulada no leito das ruas e no perímetro urbano causada por fortes precipitações, em cidades com sistemas de drenagem deficientes;
- Enxurrada: Volume de água que escoar na superfície do terreno, com grande velocidade, resultante de fortes chuvas.

Marcelino (2008) ressalta a distribuição espacial dos DN's por regiões do Brasil (Figura 3). As maiores ocorrências de desastres se concentram na região Sudeste do país, com 40% dos registros, seguidos pelo Nordeste com 32%, Sul com 23%, Norte com 4% e Centro-Oeste com 2%. O autor ainda retrata os tipos de DN's que mais ocorreram no Brasil no período de 1900 – 2006 (Figura 3), sendo as inundações o mais frequente com 59% dos registros.

Figura 3 - Tipos de desastres naturais ocorridos no Brasil e regiões de ocorrência. Onde: IN – Inundação, ES – Escorregamento, TE – Tempestades, SE – Seca, TX – Temperatura Extrema, IF – Incêndio Florestal e TR – Terremoto.



Fonte: Adaptado de Marcelino (2008)

3.2 Zona de Convergência do Atlântico Sul

A precipitação é um dos elementos atmosféricos que mais contribui para a ocorrência de desastres. Uma das consequências mais drásticas da ocorrência de chuvas intensas sobre uma determinada região são as inundações que ainda podem ser agravadas por outros fenômenos como ventos fortes, granizo e descargas elétricas (TEIXEIRA E SATYAMURTY, 2004).

A região Sudeste do Brasil é afetada pelo regime de monção. Segundo Ramage (1971), a monção é um fenômeno atmosférico que se desenvolve sobre regiões continentais em resposta ao aquecimento diferencial entre o oceano e o continente ao longo do ano. Esse aquecimento diferencial favorece a reversão sazonal do sentido dos ventos em baixos níveis da atmosfera, de forma que na estação quente, o ar úmido é transportado do oceano para o continente favorecendo a ocorrência de precipitação e na estação fria, ocorre o inverso, os ventos são transportados do continente para o oceano. Na América do Sul (AS), a Monção Sul-Americana (MSA) não mostra claramente a reversão sazonal do sentido dos ventos (ZHOU e LAU, 1998; MARENGO et al., 2012; REBOITA et al., 2010). Isso só é constatado quando a média anual das componentes do vento é subtraída da média mensal. Portanto, o que ocorre na MSA é uma reversão das anomalias do sentido dos ventos em baixos níveis (ZHOU e LAU, 1998).

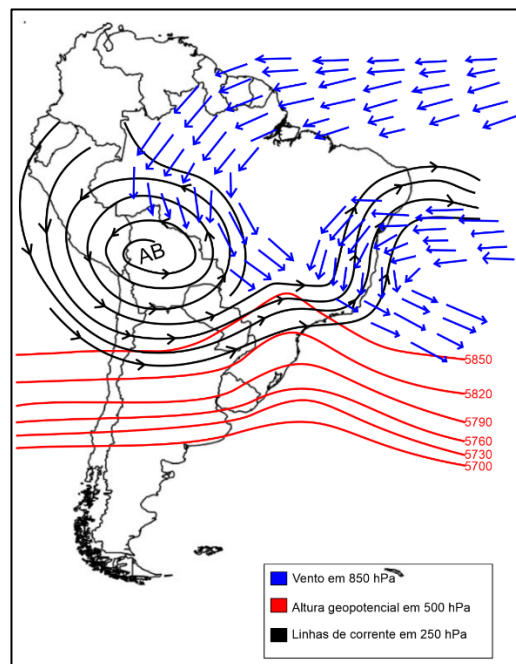
O período úmido da MSA inicia-se em meados da primavera sobre a Amazônia equatorial, quando os ventos alísios de nordeste começam a se intensificar e acabam transportando mais umidade para a região Norte do Brasil que nas demais épocas do ano (MARENGO et al, 2001; DURAN-QUESADA et al., 2012). Reboita et al. (2010) destacam que as regiões Centro-Oeste e Sudeste do Brasil apresentam duas estações do ano bem estabelecidas: uma seca entre abril e outubro e outra chuvosa de outubro a março, caracterizando a região com um clima de monção (GAN et al. 2004).

Ao acompanhar o ciclo anual da precipitação sobre a América do Sul, um sistema denominado ZCAS aparece com características marcantes associadas a um escoamento convergente de umidade na baixa troposfera, sendo reconhecido como o principal sistema de grande escala responsável pelo regime de chuvas sobre a região Sudeste do Brasil, principalmente no verão. A ZCAS é caracterizada por uma banda persistente de nebulosidade e precipitação orientada no sentido noroeste-sudeste, se estendendo desde o sul/sudeste da região Amazônica até o sudoeste do oceano Atlântico Sul (KOUSKY, 1988; KODAMA, 1993; CARVALHO et al, 2004). Na presença da ZCAS também se observa um anticiclone em altos níveis, conhecido como Alta da Bolívia (AB; Figura 4 - linhas de corrente em preto, extraída de SILVA et al., 2019). De acordo com Lenters e Cook (1999), a liberação de calor latente na Amazônia contribui para a formação da Alta da Bolívia e corrente abaixo desta há a formação de um cavado entre o Nordeste do Brasil e o Oceano Atlântico. Muitas vezes podem aparecer vórtices fechados que acabam se desprendendo do cavado sobre o Nordeste e recebem o nome de Vórtices Ciclônicos de Altos Níveis (VCANs). Na presença da ZCAS e da AB, em geral, surge um cavado sobre o Sul do Brasil e uma crista sobre a região Sudeste em altos níveis da atmosfera. Em médios níveis (Figura 4 – linhas em vermelho) se observa a presença de um cavado sobre o Sul/Sudeste do Brasil e oceano Atlântico favorecendo o movimento ascendente nesse nível da atmosfera na região (SILVA et al., 2019). Em baixos níveis (Figura 4 – vetores do vento em azul) o destaque é a umidade transportada do oceano Atlântico tropical para a região Amazônica, onde parte dessa umidade contribui para a precipitação local e parte é transportada para as regiões Centro-Oeste e Sudeste do Brasil contribuindo para a formação da ZCAS. Herdies et al. (2002), analisando o transporte de umidade entre os trópicos e subtropicais, associado ao padrão bimodal de ZCAS e NÃO-ZCAS, concluíram que este transporte ocorre por dois caminhos principais, um associado à presença da ZCAS (Figura 4 – vetores do vento em azul) e outro ao JBN (Figura não mostrada). Os JBN correspondem a um máximo de intensidade do vento entre aproximadamente 1 e 2 km de altitude, com escoamento de nordeste em direção ao sudeste AS, a leste da Cordilheira dos Andes, a qual funciona como

barreira orográfica contribuindo para que o JBN exerça uma função fundamental na circulação atmosférica de grande escala, promovendo o transporte de calor e umidade de regiões tropicais para latitudes sub e extratropicais favorecendo a formação de Sistemas e Complexos convectivos de Mesoescala. (STENSRUD, 1996; VERA et al. 2006; PLANA JUNIOR, 2021).

No Sudeste brasileiro, além da umidade originária da Amazônia, outra fonte de umidade é o oceano Atlântico Sul, uma vez que durante o período chuvoso o Anticiclone Subtropical do Atlântico Sul (ASAS) favorece o transporte de ventos mais úmidos do oceano para o interior do continente, ventos que acabam convergindo com o escoamento de noroeste advindo da região Amazônica (REBOITA et al., 2019). É importante ressaltar a atuação do ASAS ao mencionar que somente o transporte de umidade da região Amazônica não seria suficiente para compor toda a umidade observada no Sul e Sudeste do Brasil no verão (KODAMA, 1993; QUADRO, 2012)

Figura 4 - Características da ZCAS em baixos, médios e altos níveis



Fonte: Silva et al. (2019)

Nogués-Paegle et al. (2002) destacam que a ZCAS está diretamente relacionada com a Monção da América do Sul, portanto os episódios de ZCAS começam a se desenvolver predominantemente no início da primavera austral e se estendem durante todo o verão austral. Ainda na escala intrasazonal, Nogués-Paegle e Mo (1997) sugerem que o transporte de umidade advindo da região Amazônica desempenha papel essencial na intensidade e localização da

ZCAS e propicia uma gangorra de precipitação, que ocorre entre o Sudeste do Brasil e o sudeste da América do Sul (Rio Grande do Sul, Paraguai, norte da Argentina e Uruguai). Quando o esse transporte de umidade está direcionado para o Sudeste do Brasil há intensificação da ZCAS e aumento da precipitação nesta região, quando se dirige para o Sul do Brasil e região da Bacia da Prata há enfraquecimento da ZCAS e redução da precipitação no Sudeste do Brasil. Esse padrão é conhecido por gangorra, pois quando há anomalias positivas de precipitação num setor, há redução em outro.

Escobar e Costa (2005) realizaram uma classificação sinótica em 82 eventos de ZCAS, no período de 1980 a 2000, através da técnica de Análise de Componentes Principais. Foram obtidos 3 padrões sinóticos principais associados à ZCAS, os quais representam 66% do total dos casos analisados: 1) formação de uma onda frontal no oceano Atlântico, nas latitudes do norte da região Sul do Brasil, sendo que ao sul do ciclone aparece um anticiclone que permanece quase estacionário durante o início do evento; 2) passagem de uma frente fria com trajetória zonal que se acopla a uma outra frente fria que já estava atuando sobre o oceano Atlântico próximo ao Sudeste brasileiro e 3) avanço de uma frente fria clássica desde o sul do continente.

Quadro (1994) definiu alguns parâmetros meteorológicos que caracterizam a presença da Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) sobre o Brasil, durante os verões de 1980 a 1989, analisando 28 episódios de ZCAS sobre a América do Sul. A análise visual de imagens de satélites geoestacionários mostrou a convecção tropical organizada, em termos de faixa com orientação noroeste/sudeste, associada à presença de sistemas frontais oriundos do sul do continente sul-americano. As análises sugerem que um episódio de ZCAS deve ocorrer associado aos seguintes padrões meteorológicos: (i) convergência de umidade na baixa e média troposfera; (ii) faixa de movimento ascendente do ar com orientação noroeste/sudeste; (iii) um cavado semi-estacionário sobre a costa leste da América do Sul em 500 hPa; (iv) intenso gradiente de θ_0 na média troposfera e (v) uma faixa de vortacidade relativa anticiclônica em altos níveis (200 hPa).

O Grupo de Previsão do Tempo (GPT) do Centro de Previsão do Tempo de Estudos Climáticos (CPTEC-INPE) definiu como critérios para identificação diária desse sistema no ambiente operacional: 1) um fluxo de umidade em 850 hPa bem estabelecido desde a região Amazônica até o Oceano Atlântico passando pela região Centro-Oeste e Sudeste do país; 2) o campo de velocidade vertical omega ascendente (valores negativos) em 500 hPa em fase com o fluxo convergente em 850 hPa; 3) a AB e o cavado do Nordeste, geralmente bem definidos; e 4) persistência de uma zona de convergência em baixos níveis e nebulosidade por pelo menos 3 dias consecutivos. (SACRAMENTO NETO et al., 2010; ESCOBAR, 2019)

Silva et al. (2019) realizaram uma análise climatológica entre 2006 e 2017, com um total de 114 eventos de ZCAS. Analisando os meses entre outubro a abril, foi identificado que o mês com maior frequência de ocorrência é dezembro e o de menor frequência é abril. Em geral, os eventos de ZCAS possuíram duração média de 5 dias. Os autores analisaram as características dos eventos de ZCAS ocorridas no verão em relação a climatologia e as principais características encontradas foram: (1) a presença de um padrão do tipo gangorra entre o Sudeste e o Sul do Brasil, nas variáveis que indicam umidade na atmosfera, em que há anomalias positivas no Sudeste do Brasil e negativas no Sul, (2) a circulação em 850 hPa mostra um canal de umidade dirigido para o Sudeste do Brasil e a convergência desse escoamento com os ventos do setor oeste do ASAS que vão em direção ao continente, (3) presença de um cavado em níveis médios e altos da atmosfera entre o Sul do Brasil e oceano Atlântico dando suporte para a divergência em altos níveis e ocorrência de movimentos ascendentes na região do ramo oceânico da ZCAS e (4) nos episódios de ZCAS, em altos níveis, a crista sobre o Sudeste do Brasil é melhor configurada do que na climatologia do verão. No interior do continente (Amazônia e parte da região Centro-Oeste do Brasil) praticamente não ocorrem diferenças entre as composições da ZCAS e a climatologia do verão.

Rosa et al. (2020) realizaram um estudo de identificação da ZCAS e ZCAS oceânica através de um método objetivo, simplificado e automatizado baseado em radiação de onda longa (ROL) entre novembro e março de 1996 a 2016 com o objetivo de destacar suas características climatológicas. Os autores obtiveram que o método concordou com 77% das ocorrências de ZCAS em comparação com 21 anos de observações de ZCAS e encontraram que 30% dos casos se apresentaram em novembro e março. Assim, apesar da maioria dos eventos ocorrerem entre dezembro e fevereiro (70%), somente a análise nesse período não é suficiente para representar toda sua atividade. Os resultados encontrados na climatologia concordam com a literatura, com os eventos de ZCAS apresentando as seguintes estruturas dinâmicas: (i) circulação ciclônica de baixo nível sobre o continente (Baixa do Chaco fechada ou não); (ii) Cavado barotrópico próximo à costa Uruguaia, influenciando a intensidade e posição da atividade convectiva costeira e oceânica da ZCAS; (iii) Cavado do Nordeste do Brasil na alta troposfera e (iv) A Alta da Bolívia também na alta troposfera.

Barcellos et al. (2016) utilizaram a COBRADE para identificação de 35 DNs, divididos entre inundações e deslizamentos de terra, ocorridos entre os anos de 1996 e 2015 na cidade de Duque de Caxias no estado do Rio de Janeiro. Associaram esses DNs a sistemas meteorológicos, utilizando o Boletim Climanálise do CPTEC e verificaram a distribuição espacial da precipitação através de 116 pluviômetros em todo o estado do Rio de Janeiro. Como

resultado foi obtido que 57% dos desastres foram associados a ZCAS, 29% a passagem de frentes frias e 14% a áreas de instabilidades locais.

Apesar dos estudos mencionados acima identificarem a ZCAS como o sistema meteorológico responsável pelos DNs, nota-se que tais desastres não ocorrem por toda a sua extensão, mas estão restritos a algumas localidades dentro da banda de nebulosidade que a define. Percebe-se, portanto, que análises na escala sinótica não são suficientes para a compreensão dos fenômenos que levam a chuvas mais intensas.

3.3 *Vórtices Ciclônicos de Mesoescala*

De acordo com James e Johnson (2010) os vórtices ciclônicos de mesoescala (VCME) tornaram-se um tópico de crescente interesse na meteorologia de mesoescala, em grande parte devido ao reconhecimento de sua influência na iniciação, organização e evolução da convecção úmida e profunda.

Os vórtices ciclônicos de mesoescala se formam tanto nos trópicos como em latitudes médias, com diâmetros entre 50 e 300 km, são quase-estacionários, geralmente se encontram na baixa e média troposfera e em alguns casos, se desenvolvem junto com a atuação dos sistemas convectivos de mesoescala (SCM) em seus estágios maduro e de dissipação. Os VCMEs são caracterizados por concentrar vorticidade relativa ciclônica na baixa e média troposfera e ainda persistem após a dissipação do sistema convectivo. Essa persistência concentra grandes volumes de precipitação sobre a região de atuação com subsequentes inundações. Um vórtice ciclônico na região estratiforme de um SCM é caracterizado por ter um núcleo quente, onde o ar quente ascendente induz à convergência em baixos níveis e posteriormente contribui para a intensificação da vorticidade ciclônica. (BOSART e SANDERS, 1981; CHEN et al., 1998; NINOMIYA, 2007, DAVIS et al., 2004; QUADRO et al., 2016).

James e Johnson (2010) analisaram a ocorrência de 45 VCME sobre o estado de Oklahoma em um período de maio a agosto nos anos de 2002 a 2005, com uma ocorrência entre 15 e 39 eventos a cada ano. Os autores utilizaram um algoritmo que detecta os VCME a partir de campos médios de vorticidade relativa em três níveis (600, 550 e 500 hPa). Os VCME detectados satisfazem um critério onde a vorticidade relativa excede um limiar máximo e dissipam-se quando a intensidade do sistema fica abaixo de um valor mínimo. Para cada vórtice detectado, imagens de radar e satélite foram examinadas para determinar se o vórtice é de fato um VCME, sendo considerado somente se estiverem embutidos ou surgirem de precipitação

estratiforme significativa e nuvens associadas a convecção profunda e úmida. As durações mais frequentes dos VCME foram entre 6 e 10 horas, no entanto houve casos que apresentaram 5 horas ou menos de duração e o mais longo teve duração de 54 horas. Esses sistemas apresentam uma clara preferência em se iniciarem entre o final da noite e as primeiras horas da manhã (23 e 06 HL), coincidindo com a atuação de SCM e Complexos Convectivos de Mesoescala (CCM) e atingem a maturidade no final da manhã entre 06 e 12 HL, já a sua dissipação está associada ao enfraquecimento/deslocamento de um cavado de mesoescala persistente na média troposfera, não apresentando um pico significativo de horário do dia. Os autores verificaram que os sistemas têm um raio médio superior a 200 km. Os valores máximos de vorticidade ciclônica relativa encontrados nos VCMEs ficaram entre $2 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ e $2,3 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ com um pico entre $9 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ e $1,4 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$, destacando ainda que os valores exatos de vorticidade relativa seriam provavelmente dependentes da resolução do modelo (40km). Foram calculados os coeficientes de correlação entre os movimentos dos VCME e o movimento do vento ambiente em níveis atmosféricos, calculando composições dos perfis verticais dos VCME e perfis verticais do vento ambiente, este último sendo obtido através de uma média ao longo de um raio de 2° centrados nos vórtices em cada nível vertical. Com esse método, foi obtida uma correlação máxima entre a direção do vórtice e a direção do vento em 550 hPa ($r^2 = 0,83$) e uma correlação entre a velocidade do vórtice e a velocidade do vento em 500 hPa ($r^2 = 0,54$). Tais resultados indicam que os VCME são geralmente guiados pelo fluxo de níveis médios.

Os VCMEs podem estar associados a ZCAS através de um processo de retroalimentação, sendo gerado em um ambiente estratiforme da ZCAS, intensificando movimentos ascendentes e transportando umidade para altitudes elevadas. Quadro (2012) identificou VCMEs embebidos na banda de nebulosidade da ZCAS, seguindo o critério de detecção: a presença de um mínimo de vorticidade relativa (ζ) em torno de um ponto de grade em um determinado nível vertical, a existência de uma circulação fechada do vento no sentido horário em torno do ponto central do mínimo de vorticidade relativa e o valor médio da variável cobertura de nuvens nos pontos de grade acima de 90% para indicar a presença de nebulosidade na região de formação do vórtice. No período de 2000 a 2009 foram encontrados um total de 300 vórtices ciclônicos de mesoescala na baixa troposfera e 277 na média e alta troposfera, sendo importante destacar que como o sistema de detecção não identifica a evolução temporal dos vórtices, é possível que o sistema tenha sido detectado mais de uma vez. O autor realizou a identificação desses VCMEs em três diferentes regiões: ZCAS Continental Amazônica (ZCA); ZCAS Continental Costeira (ZCC), que seria a porção da ZCAS atuante na região Centro-Oeste/Sudeste do Brasil, e ZCAS Oceânica (ZCO). A maioria dos vórtices mais intensos, os quais possuem rotação ciclônica e

mínimos de vorticidade relativa, se localizam acima da Camada Limite Planetária (CLP) até aproximadamente 700hPa, na região da ZCC, possivelmente relacionados a efeitos topográficos e de instabilidade local gerada por sistemas transientes que penetram na região da ZCAS. Enfatiza, assim, que a maioria dos eventos mais intensos ocorrem na baixa troposfera, sendo possível verificar a concordância entre os VCMEs e os extremos de precipitação, no entanto não foi analisado se esses VCMEs estiveram associados a SCM.

4 Materiais e Métodos

4.1 *Região e Período de Estudo*

A região de estudo é o estado de São Paulo, localizado na região Sudeste do Brasil, possuindo uma área de aproximadamente 248 mil km². São Paulo é o estado mais populoso do país com 46,6 milhões de habitantes, concentrando 21,9% da população total brasileira. Seu relevo é composto por serras, planaltos e planícies. As menores altitudes são observadas nas regiões litorâneas, a qual é cercada pela Serra do Mar, e as maiores altitudes são encontradas na Serra da Mantiqueira com valores próximos e até superiores a 2000 m (IBGE, 2021).

Para o período de estudo foram escolhidos os anos de 2013 a 2017, devido a disponibilidade dos dados de DN's.

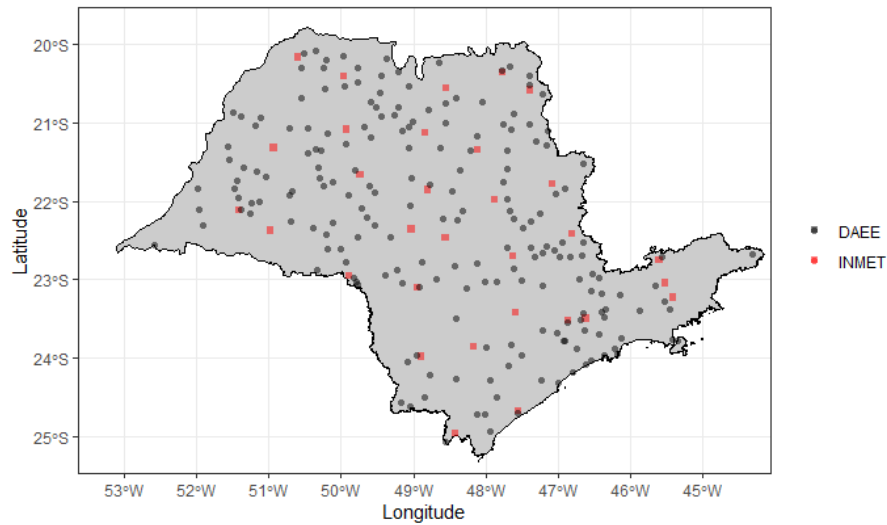
4.2 *Coleta de dados sobre os Desastres Naturais*

Para a identificação dos DN's foi utilizado o banco de dados do Sistema Integrado de Informações sobre Desastres (S2ID - <https://s2id.mi.gov.br/>), um sistema elaborado pela Secretaria Nacional de Proteção e Defesa Civil, juntamente com o Centro Universitário de Estudos e Pesquisas sobre Desastres da Universidade Federal de Santa Catarina (CEPED – UFSC) que fornece as localizações dos DN's, as datas, a classificação do desastre de acordo com a COBRADE, bem como o número de desabrigados, desalojados, feridos e mortos. Apesar da classificação de desastres mistos, proposta por Marcelino (2008), neste trabalho será usada a denominação de Desastre Natural.

4.3 *Dados Observados de Precipitação*

Foram obtidos dados diários de precipitação de 206 estações pluviométricas disponibilizados pelo Departamento de Águas e Energia Elétrica (DAEE) do estado de São Paulo para o período de janeiro de 1990 a dezembro de 2017 (Figura 5) e dados horários de precipitação de 33 estações pluviométricas do estado de São Paulo disponibilizadas no site do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) para o período de janeiro de 2013 a dezembro de 2017 (Figura 5).

Figura 5 - Estações Pluviométricas do DAEE e estações meteorológicas INMET



Fonte: João Pedro Rodrigues da Silva, 2022.

Tais dados foram submetidos a um controle de qualidade, objetivando identificar erros ocorridos no processo de registro, formatação, transmissão e arquivamento de dados, conforme diretrizes da Organização Mundial de Meteorologia (WMO – N° 1186, 2003).

Inicialmente, foi realizada uma busca por dados errôneos nas séries temporais diárias de precipitação. Por exemplo, uma precipitação diária de 500 mm ao longo de 24h em uma estação pluviométrica, onde estações vizinhas registraram valores próximos a 0 mm. Para identificar os erros foi adaptada a metodologia utilizada por Sugahara et al. (2012) denominada Variação Interquartil (Interquartile Range – IQR), representada na equação 1.

$$N = P_{98\%} + 3 * IQR \quad (1)$$

Onde P98% é o percentil 98 e IQR é a diferença entre o percentil P75% e P25% (SUGAHARA et al., 2012)

Para extrair os dados errôneos da série de precipitação foram considerados os dias com valores maiores que N, porém, somente em dias que estações pluviométricas próximas mediram valores próximos a 0 mm. Nos dias em que a precipitação foi maior que N, mas as estações próximas mediram valores próximos a N, esse dado não foi considerado como errôneo.

Para os dados horários, não foi possível utilizar a metodologia de Variação Interquartil pois o período de dados é muito curto, diante disso, foi realizada somente uma busca por dados errôneos nas séries temporais horárias de precipitação, como, por exemplo, valores de precipitação menores que zero.

A fim de complementar os dados de precipitações observadas nas estações meteorológicas, pois estas apresentam falhas temporais e espaciais, foram utilizados os dados de precipitação diária do *Climate Hazards group Infrared Precipitation with Stations* (CHIRPS), os quais são obtidos através de estimativas de precipitação por satélites com resolução de $0,05^\circ$ combinados com estações pluviométricas *in situ*. Posteriormente, a precipitação diária é produzida a partir de técnicas de interpolação com o objetivo de criar um conjunto de dados unificados, sendo fornecida em pontos de grade de $0,05^\circ \times 0,05^\circ$ desde 1981 até o presente (FUNK et al., 2015).

Para comparação dos resultados, os dados horários das estações do INMET foram acumulados para dados diários.

4.4 Identificação da ZCAS

Para identificar os dias de atuação da ZCAS foram utilizadas cartas sinóticas de superfície fornecidas pelo Grupo de Previsão do Tempo (GPT/CPTEC/INPE) produzidas de acordo com os critérios operacionais utilizados pelo GPT (ESCOBAR, 2019), as quais puderam ser comparadas com os eventos de ZCAS utilizados em Silva et al. (2019).

Para caracterizar os eventos de ZCAS utilizou-se a reanálise ERA5, oriunda de observações meteorológicas assimiladas pelo modelo global do European Centre for Medium-Range Weather Forecast (ECMWF), com resolução espacial de $0,25^\circ$ de latitude por $0,25^\circ$ de longitude e resolução temporal de 1 hora (HERSBASH et al., 2016; HERSBASH et al., 2019). As variáveis selecionadas foram:

- Umidade específica e vento em 850 hPa, para identificação das regiões de convergência de massa e transporte de umidade;
- Velocidade vertical (ω) e altura geopotencial em 500 hPa, para verificar as regiões de movimento ascendente e subsidente.
- Divergência e vento em 250 hPa, para identificar cavados e cristas em altos níveis, a presença da AB e as regiões de divergência em altos níveis que darão suporte para convergência em baixos níveis.

4.5 Identificação do Vórtice Ciclônico de Mesoescala através de um algoritmo

Com as datas dos eventos de ZCAS que estiveram associadas a DNs foi possível verificar se esses eventos ocorreram sob a influência de um vórtice ciclônico de mesoescala.

As variáveis utilizadas nessa etapa são vorticidade relativa, divergência, componentes horizontais e verticais do vento, escolhidas nos níveis de 950 hPa até 100 hPa com variação de 50 hPa. Tais variáveis foram obtidas da reanálise ERA5 descritas acima. Também foram utilizadas imagens do canal do infravermelho do satélite GOES – 13 (Divisão de Satélites Ambientais – INPE). Para a identificação foi adaptada a metodologia utilizada por Quadro (2012), baseada no desenvolvimento de um sistema objetivo de detecção da formação dos vórtices ciclônicos desenvolvido no software *GrADS*, a qual segue o critério de um mínimo de vorticidade relativa (ζ) em torno de um ponto de grade nos níveis verticais selecionados, a existência de uma circulação fechada do vento no sentido horário em torno do ponto central do mínimo de vorticidade relativa e o valor médio da variável cobertura de nuvens nos pontos de grade acima de 90% para indicar a presença de nebulosidade na região de formação do vórtice. Está última etapa não foi aplicada neste trabalho.

O sistema de detecção aplica uma varredura em todos os pontos de grade, em todos os níveis verticais disponíveis e fornece como resultado uma saída com o valor mínimo de vorticidade relativa, a latitude, a longitude e o nível de pressão para cada tempo do período de atuação da ZCAS. Com essa saída foi possível plotar os perfis verticais de vorticidade relativa e de divergência no centro do vórtice.

Nesse estudo foi escolhido o horário em que o vórtice estava mais intenso, considerando a menor vorticidade relativa e calculado o raio do sistema adaptando a metodologia de James e Jonhson (2010), onde o raio do VCME é definido onde a vorticidade relativa média entre 600 e 500hPa cai abaixo de 10% da vorticidade relativa mínima (central) do VCME, no entanto para esse estudo foi aplicado a metodologia em todos os níveis verticais utilizados.

Após a identificação e análise dos VCMEs, foram separados os eventos de ZCAS em dois grupos: os eventos que apresentaram precipitação nos locais dos VCMEs e DNs e os que não apresentaram. A partir dessa separação foi possível a escolha de dois eventos de ZCAS para realização dos estudos de casos mais detalhados.

5 Resultados

5.1 *Contagem e análise dos eventos de ZCAS, Desastres Naturais e Vórtices Ciclônicos de Mesoescala*

Foram contabilizados 62 eventos de ZCAS no período de 2013 – 2017, com uma média de aproximadamente 12 casos por ano. Com exceção de dois eventos caracterizados em maio, todos os eventos ocorreram entre outubro e abril, conforme também indicado por Silva et al. (2019) e Rosa et al (2020). O mês com maior frequência de ocorrência é fevereiro com 12 casos, representando 18% do total casos e o de menor frequência é maio com apenas dois casos, representando 3% do total. De maneira geral, com o conjunto de dados da ERA5 foi possível representar e caracterizar os eventos de ZCAS, observando os critérios de Escobar (2019): 1) canal de umidade em 850 hPa aparecendo bem estabelecido, direcionado desde a região amazônica até o oceano Atlântico, passando pelo Centro-Oeste e Sudeste do Brasil; 2) O campo de velocidade vertical ômega ascendente (negativo) em 500 hPa aparecendo em fase com o fluxo de umidade convergente em 850 hPa; 3) A presença da AB e do cavado do Nordeste e em alguns casos formando o VCAN. Apesar das características apresentadas, a banda de nebulosidade associada a ZCAS nem sempre apareceu bem definida e homogênea, em alguns casos houve quebra na organização da banda de nuvens.

Dos 62 eventos de ZCAS, 28 apresentaram DNs no estado de São Paulo e, destes 28, foram encontrados 10 casos com atuação de VCMEs (Tabela 1). Neste estudo, estes 10 casos de ZCAS com DN e VCME serão analisados em detalhes. Dos 34 eventos restantes que não apresentaram DNs, foram encontradas 31 atuações de VCME, porém com menores intensidades e duração. Por fim, 3 eventos de ZCAS não estiveram associados nem a DN nem a VCME.

Tabela 1 - Datas dos eventos de ZCAS no período de 2013 – 2017 indicando eventos de DN e VCMEs. Em destaque os eventos que serão abordados neste estudo.

N°	Sistema	Início	Final	D.N.	V.C.	N°	Sistema	Início	Final	D.N.	V.C.
1	ZCAS	10/01/2013	17/01/2013	Sim	Sim	32	ZCAS	09/02/2015	10/02/2015	Não	Sim
2	ZCAS	18/01/2013	20/01/2013	Sim	Não	33	ZCAS	15/02/2015	19/02/2015	Sim	Não
3	ZCAS	26/01/2013	28/01/2013	Sim	Sim	34	ZCAS	27/02/2015	01/03/2015	Não	Sim
4	ZCAS	29/01/2013	31/01/2013	Sim	Não	35	ZCAS	09/03/2015	15/03/2015	Sim	Sim
5	ZCAS	04/02/2013	06/02/2013	Sim	Não	36	ZCAS	17/03/2015	20/03/2015	Sim	Sim
6	ZCAS	07/02/2013	10/02/2013	Sim	Não	37	ZCAS	22/03/2015	24/03/2015	Sim	Não
7	ZCAS	28/02/2013	04/03/2013	Não	Sim	38	ZCAS	05/05/2015	07/05/2015	Não	Sim
8	ZCAS	17/03/2013	18/03/2013	Sim	Não	39	ZCAS	11/05/2015	13/05/2015	Não	Sim
9	ZCAS	22/03/2013	23/03/2013	Sim	Não	40	ZCAS	28/10/2015	30/10/2015	Não	Sim
10	ZCAS	10/04/2013	12/04/2013	Sim	Não	41	ZCAS	11/01/2016	18/01/2016	Sim	Sim
11	ZCAS	17/10/2013	21/10/2013	Não	Não	42	ZCAS	19/01/2016	24/01/2016	Sim	Não
12	ZCAS	04/11/2013	09/11/2013	Não	Sim	43	ZCAS	29/02/2016	06/03/2016	Sim	Não
13	ZCAS	11/12/2013	13/12/2013	Sim	Sim	44	ZCAS	10/03/2016	14/03/2016	Sim	Não
14	ZCAS	14/12/2013	17/12/2013	Não	Sim	45	ZCAS	24/03/2016	26/03/2016	Não	Sim
15	ZCAS	18/12/2013	25/12/2013	Não	Sim	46	ZCAS	27/03/2016	28/03/2016	Sim	Não
16	ZCAS	26/12/2013	27/12/2013	Não	Sim	47	ZCAS	05/10/2016	09/10/2016	Não	Sim
17	ZCAS	17/01/2014	20/01/2014	Não	Sim	48	ZCAS	15/11/2016	20/11/2016	Não	Sim
18	ZCAS	15/02/2014	19/02/2014	Sim	Sim	49	ZCAS	04/12/2016	06/12/2016	Não	Sim
19	ZCAS	23/02/2014	25/02/2014	Não	Sim	50	ZCAS	12/12/2016	16/12/2016	Não	Sim
20	ZCAS	28/02/2014	02/03/2014	Não	Sim	51	ZCAS	13/01/2017	16/01/2017	Sim	Sim
21	ZCAS	06/03/2014	10/03/2014	Não	Sim	52	ZCAS	17/01/2017	23/01/2017	Sim	Sim
22	ZCAS	22/03/2014	25/03/2014	Não	Sim	53	ZCAS	26/01/2017	29/01/2017	Sim	Não
23	ZCAS	14/04/2014	15/04/2014	Não	Não	54	ZCAS	25/02/2017	01/03/2017	Sim	Sim
24	ZCAS	24/04/2014	28/04/2014	Não	Não	55	ZCAS	28/03/2017	02/04/2017	Sim	Não
25	ZCAS	26/10/2014	30/10/2014	Não	Sim	56	ZCAS	22/10/2017	24/10/2017	Não	Sim
26	ZCAS	15/11/2014	19/11/2014	Não	Sim	57	ZCAS	01/11/2017	02/11/2017	Sim	Não
27	ZCAS	27/11/2014	30/11/2014	Não	Sim	58	ZCAS	11/11/2017	15/11/2017	Não	Sim
28	ZCAS	14/12/2014	17/12/2014	Sim	Não	59	ZCAS	19/11/2017	24/11/2017	Sim	Não
29	ZCAS	24/12/2014	26/12/2014	Não	Sim	60	ZCAS	28/11/2017	29/11/2017	Não	Sim
30	ZCAS	22/01/2015	24/01/2015	Não	Sim	61	ZCAS	01/12/2017	15/12/2017	Não	Sim
31	ZCAS	05/02/2015	08/02/2015	Não	Sim	62	ZCAS	23/12/2017	30/12/2017	Não	Sim

Fonte: João Pedro Rodrigues da Silva, 2022.

A Tabela 2 destaca as características dos DNs ocorridos em cada um dos 10 eventos de ZCAS+DN+VCME fornecidas pelo S2ID, evidenciando o número de cidades afetadas, a classificação do desastre natural de acordo com o COBRADE, o número de mortos, feridos, desabrigados e desalojados. Grande parte das classificações dos desastres naturais feito pela COBRADE apresentaram tempestades locais e convectivas que possivelmente foram responsáveis por inundações e alagamentos. Apesar do evento de número 1 apresentar o maior número de cidades afetadas não foi possível constatar o número de mortes. O destaque foi feito para o evento da ZCAS de número 41, que apresentou a segunda maior quantidade de cidades afetadas e números expressivos nos quesitos de desalojados e desabrigados.

Tabela 2 - Características dos DNs fornecidos pelo S2ID nos eventos de ZCAS+DN+VCME.
*Indica dados faltantes

S2ID	Eventos									
	ZCAS 1	ZCAS 3	ZCAS 13	ZCAS 18	ZCAS 35	ZCAS 36	ZCAS 41	ZCAS 51	ZCAS 52	ZCAS 54
Nº de cidades afetadas	45	5	2	1	1	6	8	1	4	1
COBRADE	a) Inundações b) Tempestade Local-Convectiva: Vendaval c) Enxurradas d) Deslizamentos e) Alagamentos	a) Enxurradas b) Tempestade Local-Convectiva: Vendaval	a) Tempestade Local-Convectiva: Vendaval	a) Enxurradas	a) Tempestade Local-Convectiva: Chuvas Intensas	a) Tempestade Local-Convectiva: Chuvas Intensas b) Alagamentos c) Deslizamentos	a) Inundações b) Tempestade Local-Convectiva: Chuvas Intensas c) Enxurradas d) Deslizamentos e) Alagamentos	a) Enxurradas b) Inundações	a) Tempestade Local-Convectiva: Chuvas Intensas	a) Enxurradas
Mortos	*	0	0	0	0	0	1	0	1	0
Feridos	43	3	64	1	0	0	14	0	0	0
Desabrigados	0	0	24	0	6	19	27	4	27	8
Desalojados	14	6	152	9	249	305	721	10	270	18

Fonte: João Pedro Rodrigues da Silva, 2022.

A Tabela 3 destaca a quantidade de eventos de ZCAS que ocorreram ou não concomitantemente os DN e VCME. As análises desse estudo foram feitas com a primeira e terceira linha da Tabela 3, ou seja, os eventos de ZCAS em que foram observados VCME, totalizando 41 eventos, que corresponde a 66,1% do total.

Tabela 3 – Número de eventos analisados e porcentagem correspondente

DN	VCME	Nº de eventos	%
Sim	Sim	10	16,1
Não	Não	3	4,8
Não	Sim	31	50
Sim	Não	18	29

Fonte: João Pedro Rodrigues da Silva, 2022.

As Tabela 4 e Tabela 5 destacam as comparações quantitativas de eventos de ZCAS e VCME com ocorrência de desastres naturais (ZCAS+DN+VCME, $10/41 = 24\%$) e sem a ocorrência de desastres naturais (ZCAS-DN+VCME, $31/41 = 76\%$), respectivamente. Nos eventos de ZCAS com VCME e DN (10 casos), em todos os casos os VCME estiveram presentes nos níveis de 500, 700 e 850 hPa, e apenas em 7 casos no nível de 250 hPa. Com relação aos eventos ZCAS e VCME mas sem desastres naturais houve um total de 31 eventos, os quais seguiram o padrão de maiores números de aparições dos vórtices em médios e baixos níveis.

Tabela 4 – Eventos de ZCAS com VCME e com desastres naturais (ZCAS+DN+VCME)

28 eventos de ZCAS com DN e 10 VCME	250 hPa	500 hPa	700hPa	850 hPa
N° de aparições de VCME nos eventos com DN	7	10	10	10
Porcentagem de VCME nos eventos com DN (%)	25,0	35,7	35,7	35,7
Média de duração dos 10 casos com VCME (horas)	9,9	11	13,9	11,9

Fonte: João Pedro Rodrigues da Silva, 2022.

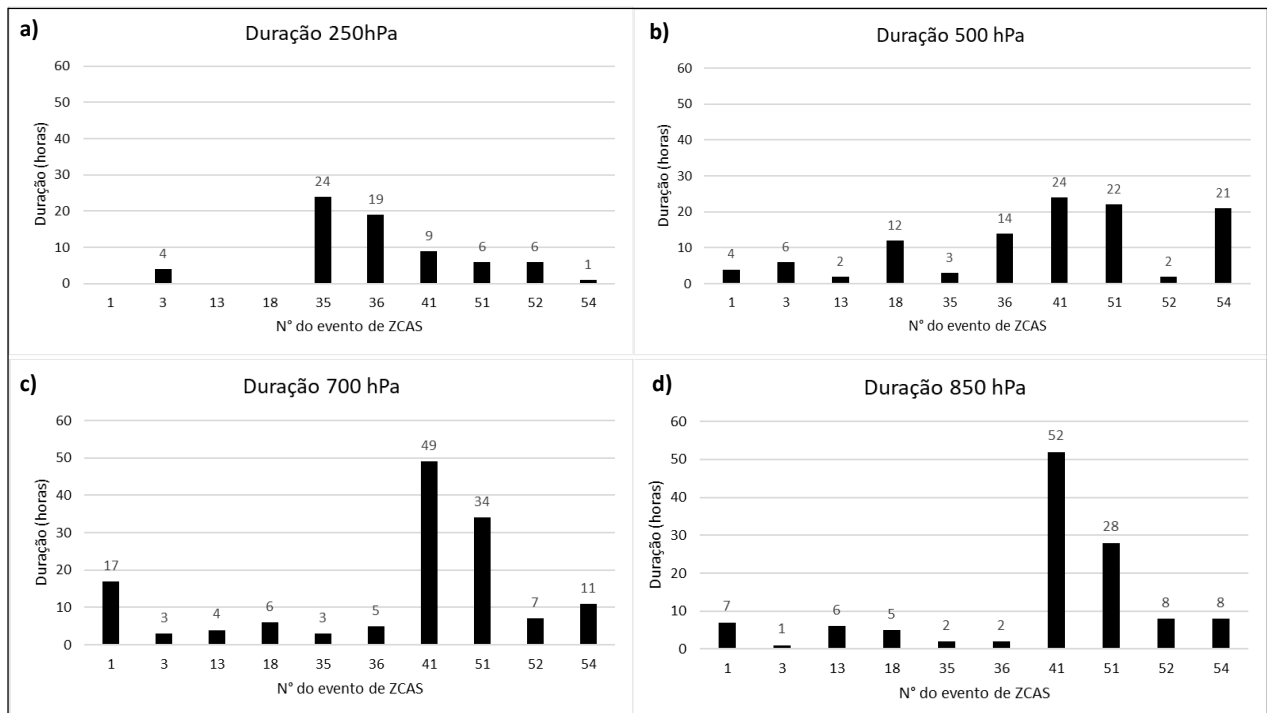
Tabela 5 - Eventos de ZCAS com VCME e sem desastres naturais (ZCAS-DN+VCME)

34 eventos de ZCAS sem DN e 31 VCME	250 hPa	500 hPa	700hPa	850 hPa
N° de aparições de VCME nos eventos sem DN	3	11	17	20
Porcentagem de VCME nos eventos sem DN (%)	8,8	32,4	50,0	58,8
Média de duração dos 31 casos com VCME (horas)	1,3	6,4	3,6	4,4

Fonte: João Pedro Rodrigues da Silva, 2022.

A duração dos eventos deve ser destacada uma vez que os VCME na ocorrência de desastres naturais apresentaram praticamente o dobro e até o triplo da duração média dos eventos sem a ocorrência de desastres (Tabela 4 e Tabela 5). No entanto, por se tratar de uma média é importante ressaltar os eventos separadamente. Na Figura 6 se observa que os casos a partir da ZCAS 35 foram os que apresentaram as maiores durações, sendo os responsáveis pela elevação da média, com um destaque importante para o evento da ZCAS 41 com uma duração de 49h e 52h, nos níveis de 700 hPa e 850 hPa, respectivamente.

Figura 6 - Duração (horas) dos VCME nos níveis verticais: a)250hPa; b)500hPa; c)700hPa e d)850hPa



Fonte: João Pedro Rodrigues da Silva, 2022.

A Tabela 6 destaca a localização dos vórtices ciclônicos de mesoescala dentro do estado de São Paulo bem como a estação meteorológica que apresentou o maior acumulado de chuva no período de ZCAS de acordo com a rede DAEE. Os casos de ZCAS que apresentaram a ocorrência de DNs no local de atuação do VCME foram a ZCAS 1, 18, 41 e 52, e isso pode ser explicado pelos volumes de precipitação observados. Apesar dos quatro eventos apresentarem acumulados de precipitação superiores aos outros casos, dois deles foram tratados como exceção na Tabela 7: A ZCAS 1 – não havia estações da rede de coleta de dados no local do VCME, sendo utilizado o dado do CHIRPS como análise – e a ZCAS 41 – em que ocorreu um sistema convectivo de mesoescala antes da ocorrência do VCME, ou seja, o elevado acumulado de precipitação foi devido principalmente ao sistema convectivo e não ao VCME. Desta maneira foram separados os eventos de ZCAS em dois grupos: os eventos que apresentaram precipitação nos locais dos VCMEs e DNs (ZCAS 1, 18, 41, 52) e os que não apresentaram (ZCAS 3, 13, 35, 36, 51, 54). As características de cada um dos grupos serão mostradas a seguir e, depois, serão feitos estudos detalhados da ZCAS 41 e da ZCAS 35.

Tabela 6 – Características da localização dos VCMEs nos 10 eventos de ZCAS+DN+VCME e a precipitação acumulada no período da ZCAS. *Indica dados faltantes. ** Precipitação esteve associada ao VCME, porém foi observada a presença de um SCM que contribuiu com a precipitação.

	ZCAS 1	ZCAS 3	ZCAS 13	ZCAS 18	ZCAS 35	ZCAS 36	ZCAS 41	ZCAS 51	ZCAS 52	ZCAS 54
Localização do VCME	Extremo leste do estado de São Paulo	Norte do Estado de SP (Divisa com MG)	Norte do Estado de SP (Divisa com MG)	Sul do Estado de SP (litorânea)	Oeste do Estado de SP	Leste do Estado de SP	Centro Norte do Estado de SP	Noroeste do Estado de SP	Oeste do Estado de SP	Leste do Estado de SP
Estação do DAEE com maior acumulado de precipitação no período de ocorrência da ZCAS (mm)	Barbosa 305,9	Praia Grande 121,1	Bertioga 194,1	Pedro de Toledo 268,3	Pedro de Toledo 190,3	Mongaguá 242,2	Bebedouro 377,8	Guararapes 157,9	Embura 348,9	Alinópolis 143
Máximo de Precipitação esteve associada ao VCME	Sim*	Sim	Não	Sim	Não	Não	Não**	Sim	Sim	Não
Ocorrência de desastres naturais associados diretamente ao VCME	Sim	Não	Não	Sim	Não	Não	Sim	Não	Sim	Não

Fonte: João Pedro Rodrigues da Silva, 2022.

A Tabela 7 (Tabela 8) destaca as características dos VCMEs nos eventos de ZCAS que apresentaram (não apresentaram) precipitação nos locais dos VCMEs e DNs. Todos os eventos da Tabela 7 apresentaram divergência negativa em baixos níveis, ou seja, convergência em baixos níveis; valores negativos elevados de vorticidade, representando a vorticidade ciclônica desses sistemas e elevados valores no acumulado de precipitação. Já nos eventos da Tabela 8, foram observados uma predominância dos valores negativos de vorticidade em médios e altos níveis, a falta de um padrão no campo de divergência bem estabelecido nos níveis atmosféricos, bem como menores valores no acumulado de precipitação se comparado com os eventos da Tabela 7.

Os eventos de VCME mais intensos em vorticidade ciclônica mostrados na Tabela 7 se apresentaram em baixos níveis (800 – 850 hPa), demonstrando uma relação com os maiores acumulados de precipitação e conseqüentemente com a ocorrência de DNs. Os sistemas apresentaram entre 50 e 160 km de raio nos níveis verticais analisados, sendo menores que os encontrados por Davis et al. (2002) e James e Johnson (2010), os quais destacaram raios médios em torno de 185 km e 224 km, respectivamente. Em termos médios foi possível identificar que os VCMEs da Tabela 7 foram maiores que os VCMEs da Tabela 8, ou seja, os sistemas mais intensos tendem a se localizar em níveis mais baixos, possuem maiores raios e tendem a ser mais circulares. A ZCAS 13 entra como exceção nesse caso, uma vez que mesmo o VCME estando em baixos níveis, apresentou uma vorticidade baixa, dificultando a identificação dos raios ao aplicar a metodologia proposta. Os eventos com maiores durações não demonstram uma relação direta com os maiores acumulados de precipitação, e essa relação fica ainda mais

distante ao se comparar com a atuação nos níveis verticais, uma vez que os VCMEs mais duradouros atuaram tanto em baixos como médios níveis, não sendo possível estabelecer um padrão, evidenciando que a duração dos VCMEs pode não ser um fator preponderante para a ocorrência dos DNs. Apesar da importância dos VCMEs na ocorrência de precipitação e consequentemente desastres naturais, nem todos os casos de DNs estiveram associados a VCMEs diretamente.

Tabela 7 - Características meteorológicas dos VCMEs nos eventos de ZCAS que apresentaram precipitação no local dos VCME e DNs. *Indica que não houve VCME nesse nível e **Indica que não foi possível identificar o raio do VCME devido ao seu formato mais alongado.

EVENTOS					
	ZCAS 1	ZCAS 18	ZCAS 41	ZCAS 52	
Máxima convergência encontrada (10^{-4} s^{-1}) e o respectivo nível vertical	-0,6 (500 hPa)	-3,6 (900 hPa)	-4,3 (850 hPa)	-3,5 (700 hPa)	
Mínima vorticidade encontrada (10^{-4} s^{-1}) e o respectivo nível vertical	-2,5 (500 hPa)	-7,9 (900 hPa)	-8,9 (850 hPa)	-8,9 (700 hPa)	
Duração do VCME (horas)	17	12	52	8	
Estação do DAEE com maior acumulado de precipitação no período de ocorrência da ZCAS (mm)	Barbosa 305,9	Pedro de Toledo 268,3	Bebedouro 377,8	Embura 348,9	
Raios	250 hPa	*	*	50	**
dos	500 hPa	110	100	70	90
VCME	700 hpa	**	70	140	160
(km)	850 hPa	70	110	110	70

Fonte: João Pedro Rodrigues da Silva, 2022.

Tabela 8 - Características meteorológicas dos VCMEs nos eventos de ZCAS que não apresentaram precipitação no local dos VCME e DN. *Indica que não houve VCME nesse nível e **Indica que não foi possível identificar o raio do VCME devido ao seu formato mais alongado.

		EVENTOS					
		ZCAS 3	ZCAS 13	ZCAS 35	ZCAS 36	ZCAS 51	ZCAS 54
Mínima divergência encontrada (10^{-4} s^{-1}) e o respectivo nível vertical		-2,1 (750 hPa)	-0,5 (900 hPa)	-1,4 (300-250 hPa)	-1,1 (600 hPa)	-2,3 (450-600 hPa)	-0,8 (600 hPa)
Mínima vorticidade encontrada (10^{-4} s^{-1}) e o respectivo nível vertical		-5,1 (750 hPa)	-1,5 (900 hPa)	-3,3 (300-250 hPa)	-3,4 (600 hPa)	-5,9 (450-600 hPa)	-2,4 (600 hPa)
Duração do VCME (horas)		31	8	37	25	28	38
Estação do DAEE com maior acumulado de precipitação no período de ocorrência da ZCAS (mm)		Praia Grande 121,1	Bertioga 194,1	Pedro de Toledo 190,3	Mongaguá 242,2	Guararapes 157,9	Altinópolis 143
Raios	250 hPa	70	*	**	**	70	70
dos	500 hPa	70	**	**	90	110	70
VCME	700 hPa	80	**	**	70	70	80
(km)	850 hPa	80	**	**	**	**	**

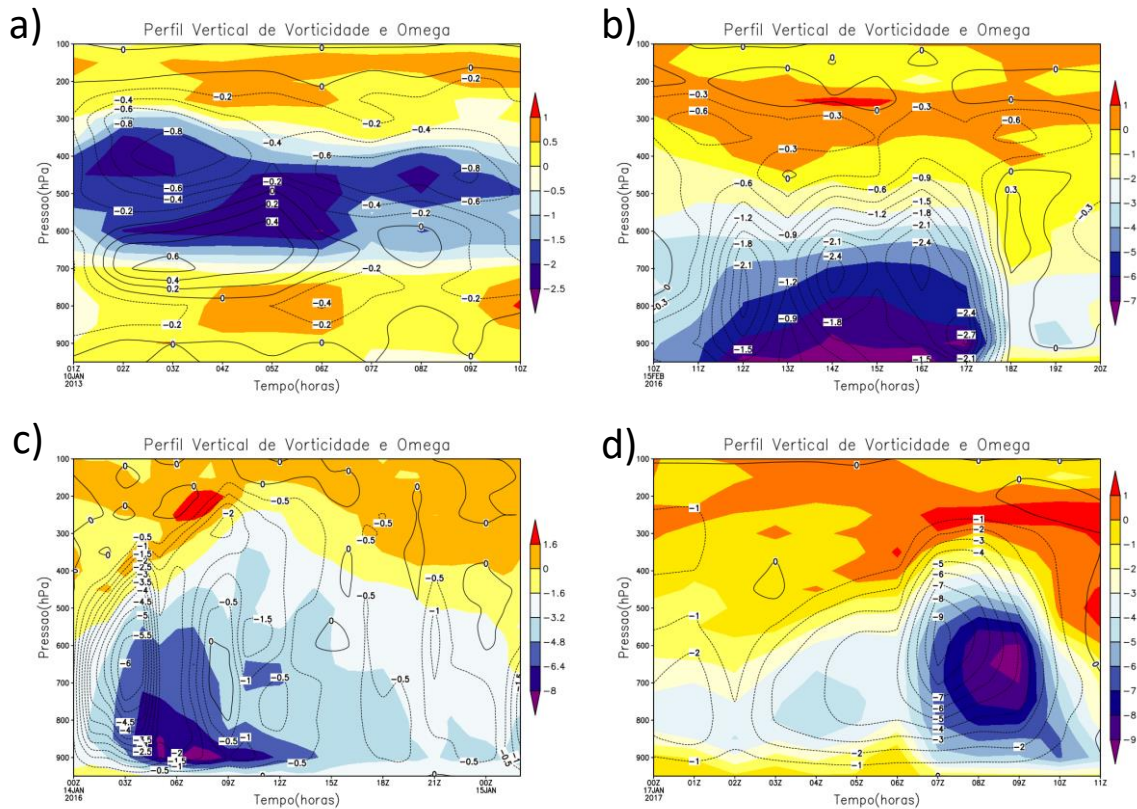
Fonte: João Pedro Rodrigues da Silva, 2022.

Ao analisar os perfis verticais de vorticidade relativa e omega dos eventos de ZCAS+DN+VCME, com exceção da ZCAS 1 (Figura 7a) que apresentou os menores valores de vorticidade em níveis médios da atmosfera, todos os outros eventos (ZCAS 18, ZCAS 41 e ZCAS 52, Figura 7b, c, d) apresentaram os menores valores de vorticidade em baixos níveis da atmosfera associado com os menores valores de ômega, destacando movimentos ascendentes em praticamente toda a coluna atmosférica. Esse mesmo padrão é observado na Figura 8, no perfil vertical de divergência e ômega, com exceção da ZCAS 1, os outros eventos destacaram convergência em baixos níveis e divergência em altos níveis, que corroboram com o movimento ascendente na região de atuação do VCME.

Com relação aos eventos de ZCAS – DN + VCME, os perfis verticais de vorticidade relativa e ômega (Figura 9), apresentaram em predominância um padrão de menores valores de vorticidade relativa em médios e altos níveis da atmosfera, não destacando um padrão de no campo de ômega, e conseqüentemente de movimento ascendente na coluna atmosférica. A análise fica ainda mais complexa de estabelecer um padrão quando se olha para os perfis verticais de divergência e ômega (Figura 10), onde, com exceção da ZCAS 36 e ZCAS 51 (Figura

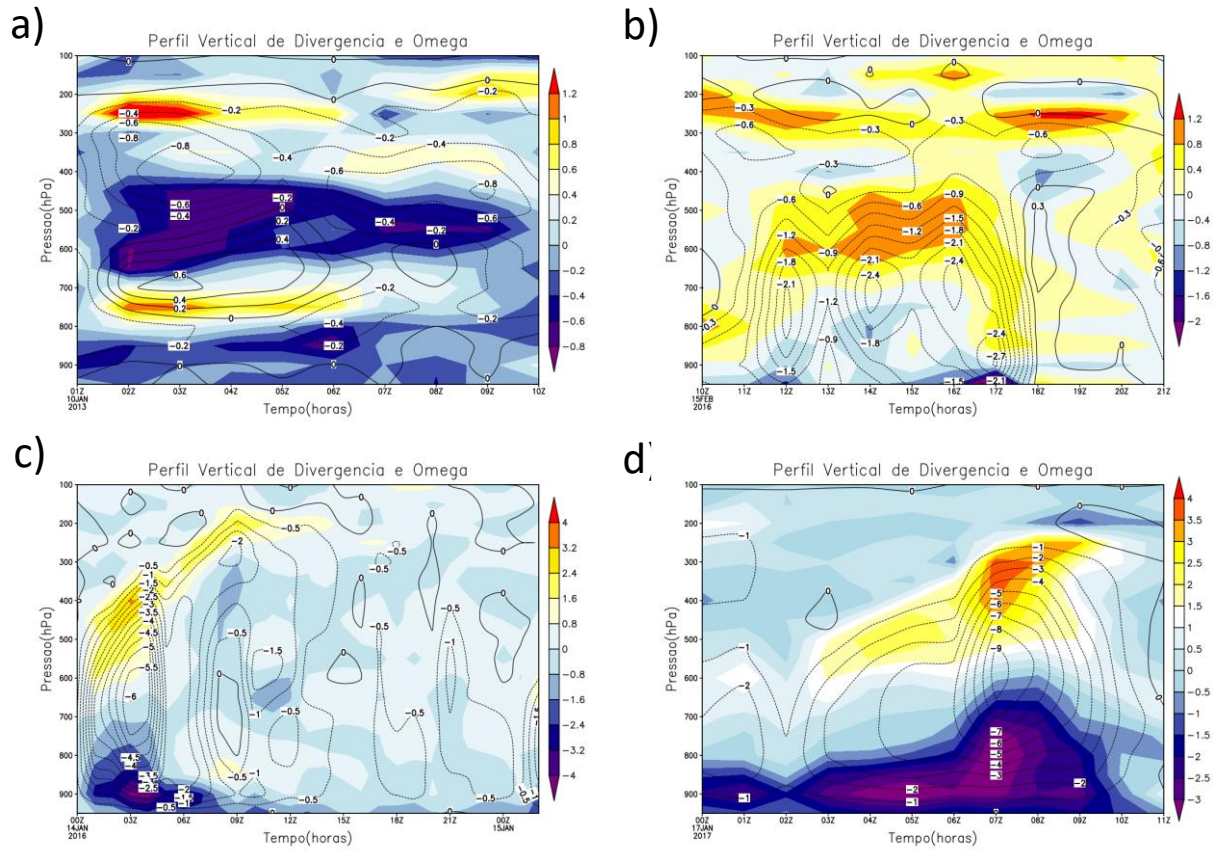
10d, e), nenhum outro evento mostrou uma região específica com convergência e/ou divergência em um nível específico da atmosfera.

Figura 7 – Perfis verticais de vorticidade relativa (10^{-4} s^{-1} , colorido) e ômega (Pa s^{-1} , linhas em preto, valores negativos em linhas tracejadas) no centro do VCME nos casos a) ZCAS 1, b) ZCAS 18, c) ZCAS 41 e d) ZCAS 52. (Escala de cores diferentes para cada evento).



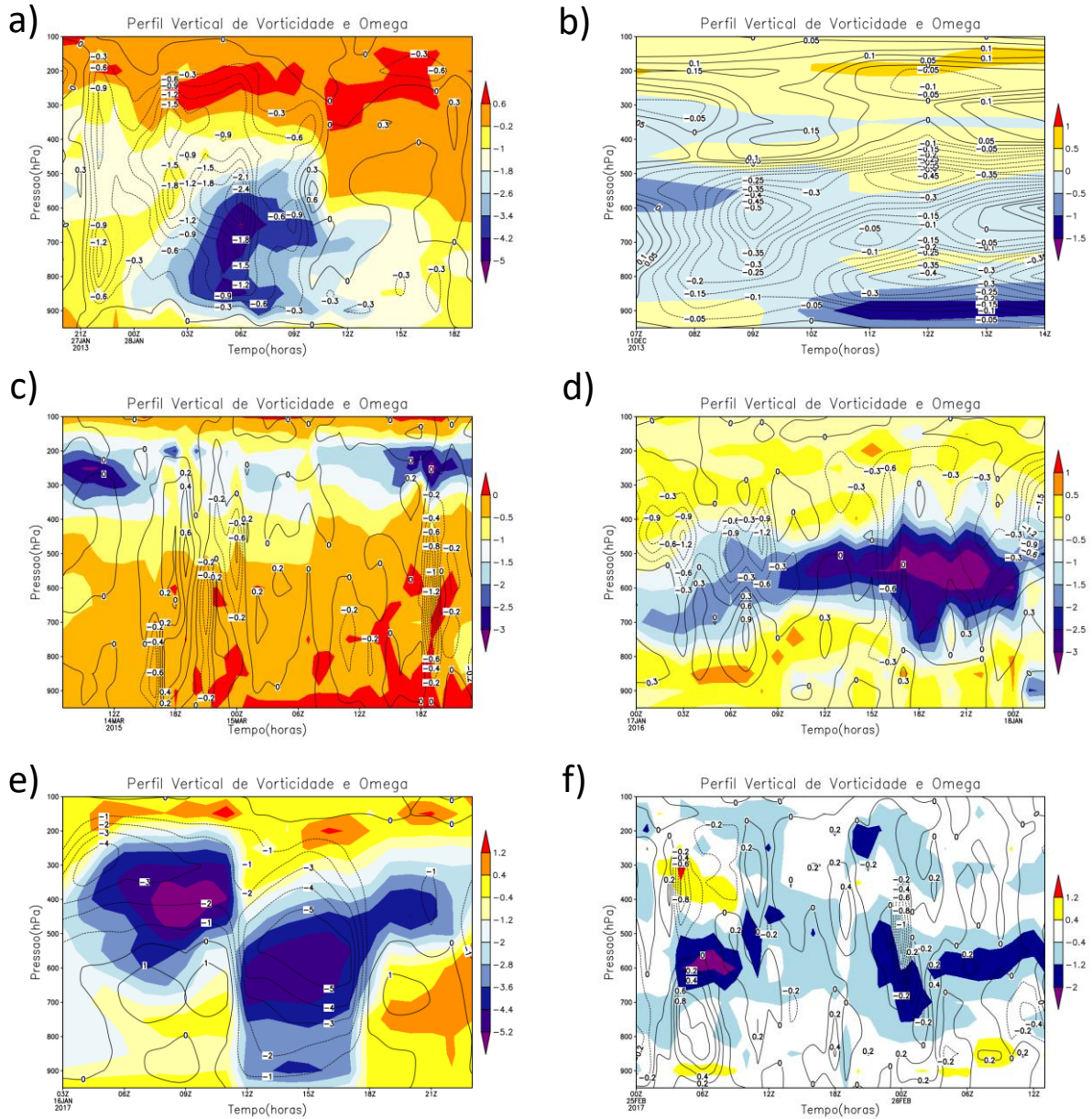
Fonte: João Pedro Rodrigues da Silva, 2022.

Figura 8 - Perfis verticais de divergência (10^{-4} s^{-1} , colorido) e ômega (Pa s^{-1} , linhas em preto, valores negativos em linhas tracejadas) no centro do VCME nos casos a) ZCAS 1, b) ZCAS 18, c) ZCAS 41 e d) ZCAS 52. (Escala de cores diferentes para cada evento).



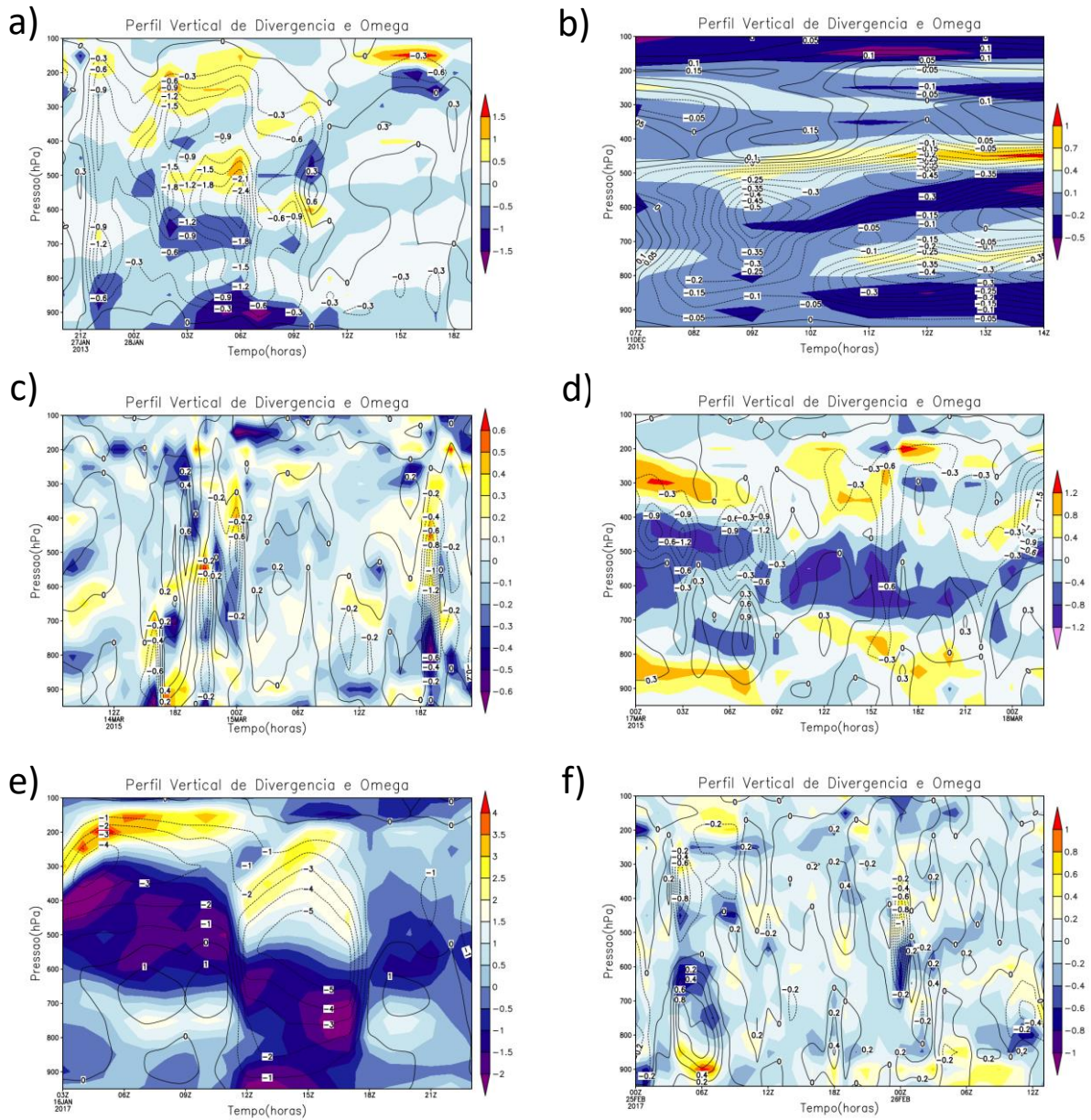
Fonte: João Pedro Rodrigues da Silva, 2022.

Figura 9 - Perfis verticais de vorticidade relativa (10^{-4} s^{-1} , colorido) e ômega (Pa s^{-1} , linhas em pretos, valores negativos em linhas tracejadas) nos casos a) ZCAS 3, b) ZCAS 13, c) ZCAS 35, d) ZCAS 36, e) ZCAS 51 e f) ZCAS 54. (Escala de cor diferente para cada evento).



Fonte: João Pedro Rodrigues da Silva, 2022.

Figura 10 - Perfis verticais de divergência (10^{-4} s^{-1} , colorido) e ômega (Pa s^{-1} , linhas em pretos, valores negativos em linhas tracejadas) nos casos a) ZCAS 3, b) ZCAS 13, c) ZCAS 35, d) ZCAS 36, e) ZCAS 51 e f) ZCAS 54. (Escala diferente para cada evento).

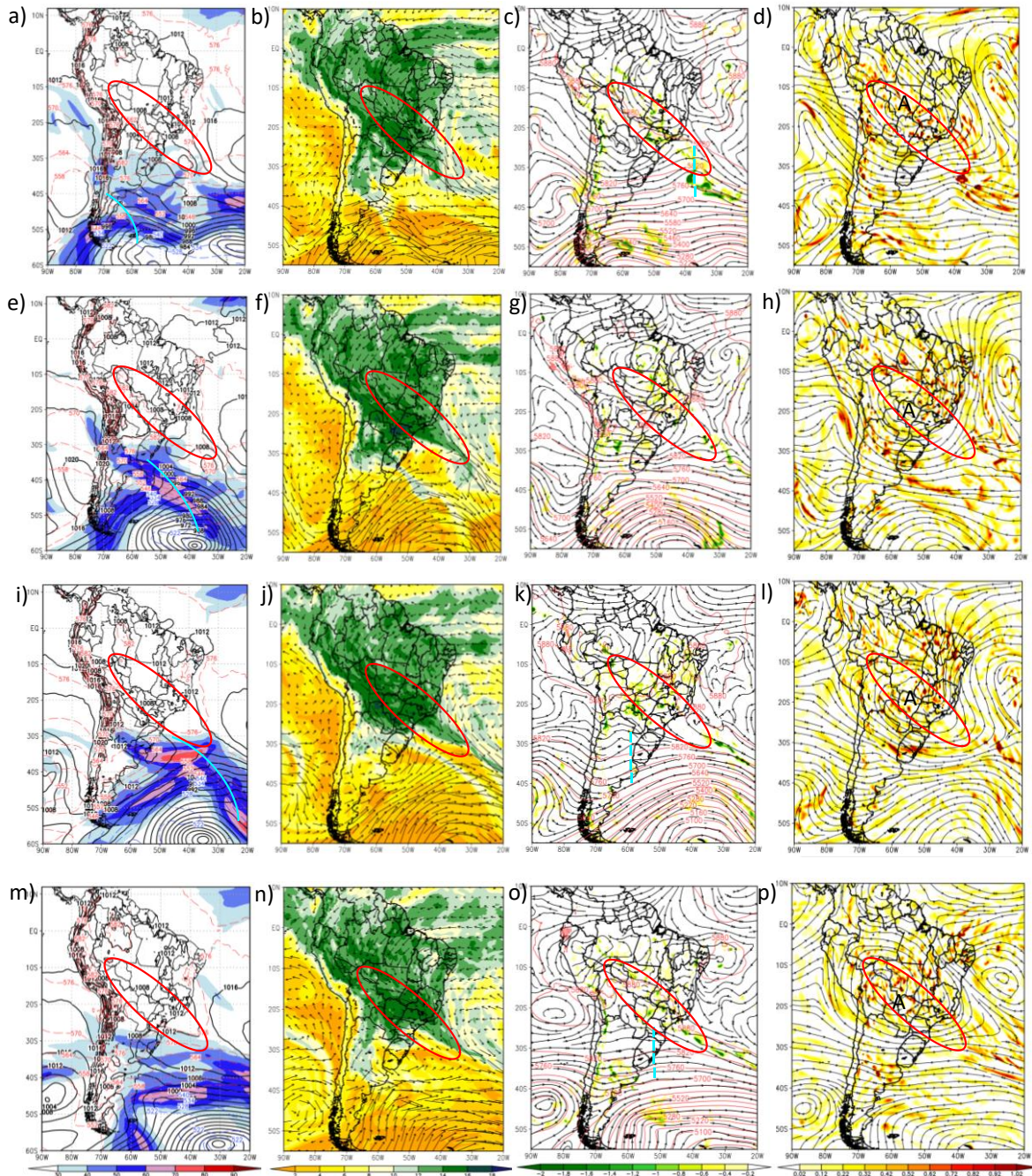


Fonte: João Pedro Rodrigues da Silva, 2022.

5.2 *Estudo de caso do evento de ZCAS 41*

O episódio de ZCAS 41 ocorreu entre 11 e 18 de janeiro de 2016. Entretanto, atuou sobre o estado de São Paulo somente até o dia 15. Esse evento afetou 8 cidades com DNs no estado de São Paulo, sendo registrados pela COBRADE como inundações, tempestade local/convectiva, alagamentos, deslizamentos de terra e enxurradas, entre os dias 11 a 16 de janeiro. A ZCAS tem início entre os dias 11 e 12 com um suporte de um ciclone sobre o oceano Atlântico Subtropical (Figura 11a) onde é possível notar uma confluência dos ventos próximos a superfície e no nível de 850 hPa e apesar de não afetar diretamente na atuação inicial da ZCAS há a presença de um sistema frontal atuando sobre a Oceano Atlântico Sul (Figura 11a, e, i, m, linha em azul claro), que se acopla à ZCAS no dia 14. Sobre a região Norte e Nordeste do Brasil é possível destacar a entrada dos ventos alísios transportando umidade do oceano Atlântico tropical para o interior do continente em direção ao centro da América do Sul. Parte dessa umidade é precipitada na região Amazônica e o restante, somada com a evapotranspiração da floresta, é defletida pela Cordilheira dos Andes e transportada para a região Centro-Oeste e Sudeste do Brasil, juntando-se aos ventos da Alta Subtropical do Atlântico Sul (Figura 11b). No campo de velocidade vertical e altura geopotencial em 500 hPa (Figura 11c) nota-se um cavado associado ao ciclone em superfície sobre o Oceano Atlântico, porém, se destacam valores negativos de ômega sobre a região Sudeste do país, principalmente sobre o estado de São Paulo, indicando movimento ascendente, que associado aos elevados valores de umidade específica em baixos níveis auxilia na formação de nuvens e, conseqüentemente, ocorrência de precipitação nesse evento. No campo de divergência e linhas de corrente em 250 hPa (Figura 11d) nota-se o escoamento de altos níveis recorrentes em eventos de ZCAS, com a presença da Alta da Bolívia, um cavado a leste da região nordeste do Brasil, associado ao VCAN, e a presença de divergência nesse nível, principalmente sobre o estado de São Paulo, fornecendo suporte para uma convergência em baixos níveis.

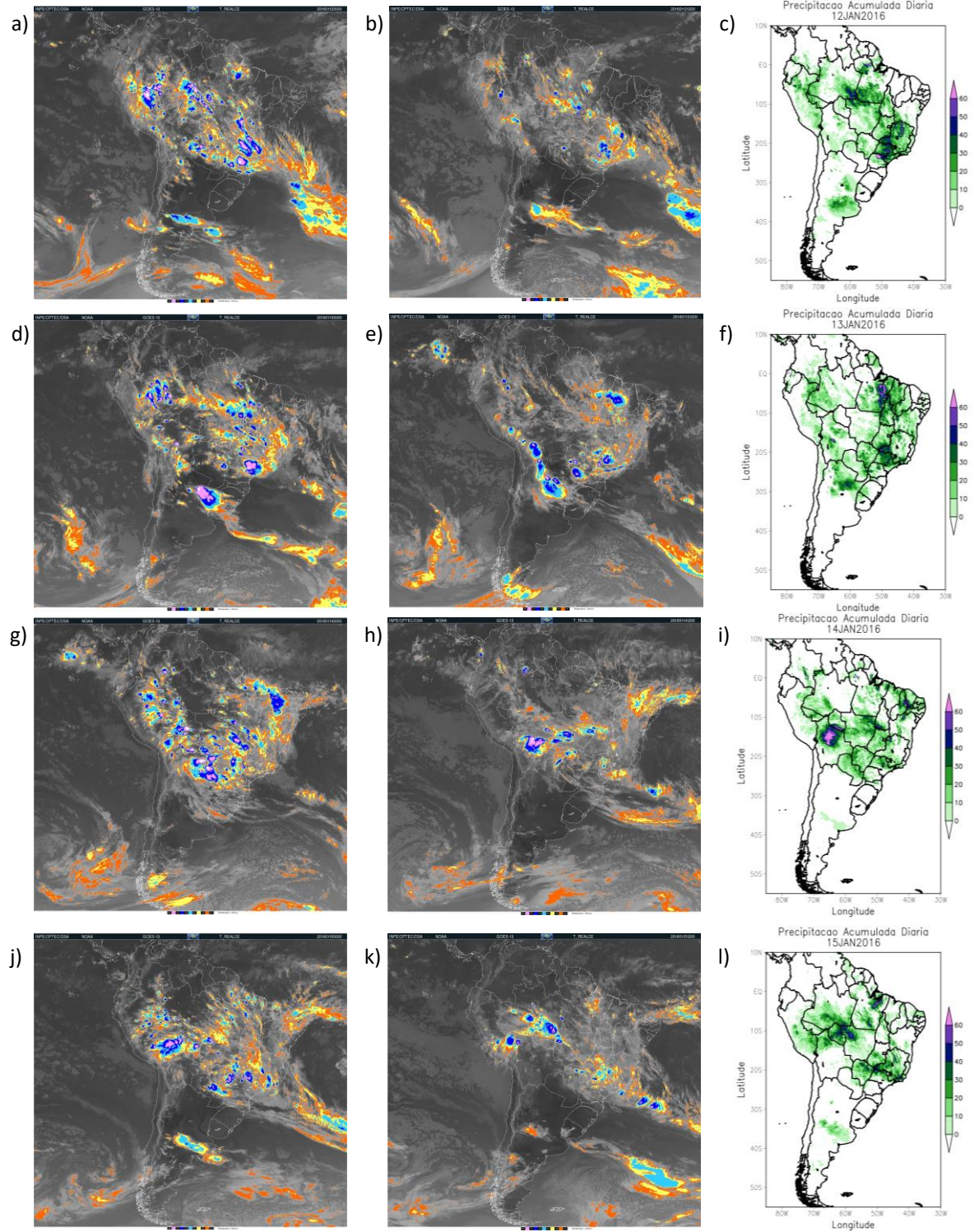
Figura 11 - Campos Sinóticos. a), e), i), m) Pressão a nível médio do mar (hPa, linhas contínuas em preto), Espessura da camada entre 500 e 1000 hPa (dam, linhas tracejadas em azul e vermelho) e magnitude do vento em 250 hPa (m/s, colorido); b), f), j), n) Umidade Específica (g kg^{-1} , colorido) e vetores do vento (m s^{-1}) em 850 hPa; c), g), k) o) Omega (Pa s^{-1} , colorido), altura geopotencial (m, linhas vermelhas) e linhas de corrente em 500 hPa; d), h), l), p) Divergência (10^{-5} s^{-1} , colorido) e linhas de corrente em 250 hPa às 00Z para os dias 12, 13, 14 e 15 de janeiro de 2016. Elipse em vermelho indica a região de atuação da ZCAS.



Fonte: João Pedro Rodrigues da Silva, 2022.

O padrão característico de ZCAS se mantém em todos os níveis da atmosfera no decorrer de todos os dias do evento, com pequenos deslocamentos do cavado e do movimento ascendente em médios níveis, bem como da divergência e da Alta da Bolívia em altos níveis. Ao observar as imagens de satélite e precipitação é possível destacar durante o dia 12 (Figura 12 a, b, c) uma banda de nebulosidade e precipitação bem formada no sentido Noroeste-Sudeste, com o máximo de precipitação entre o norte do estado do Paraná e região central do estado de São Paulo. Do dia 13 em diante a ZCAS sofre uma quebra na banda de nebulosidade e chuva, o que pode ser explicado pela formação de um sistema convectivo de mesoescala sobre o estado de São Paulo (Figura 12d, e, f), o qual foi responsável por uma precipitação superior a 60 mm no dia 13. Nos dias 14 e 15, há atividades convectivas mais espalhadas em todo o território brasileiro, o SCM se dissipa e a atividade convectiva remanescente sobre o estado de São Paulo se dá devido à formação do VCME, o qual será detalhado a seguir. A partir do dia 15 a ZCAS se desloca para o norte de Minas Gerais e sul da Bahia e posteriormente rumo a seu declínio. Apesar da quebra da banda de nebulosidade e com a atuação do SCM somente no dia 13, através das figuras do acumulado de precipitação foi possível verificar que durante todo o evento de ZCAS o estado de São Paulo foi atingido por elevados volumes de precipitação, totalizando valores acumulados superiores a 300 mm.

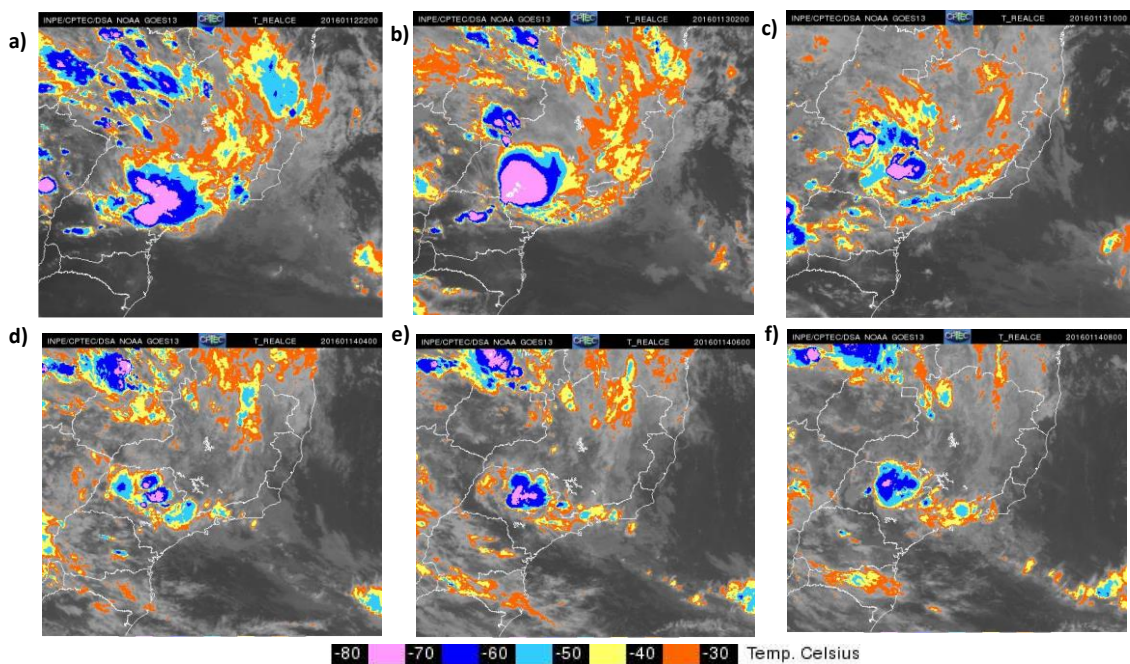
Figura 12 – Imagens do Canal do Infravermelho do Satélite GOES – 13 para os dias 12, 13, 14 e 15 de janeiro de 2016 nos horários da 00Z (a, d, g, j) e 12Z (b, e, h, k), respectivamente, e a precipitação acumulada (mm) do programa CHIRPS nos mesmos dias (c, f, i, l).



Fonte: João Pedro Rodrigues da Silva, 2022.

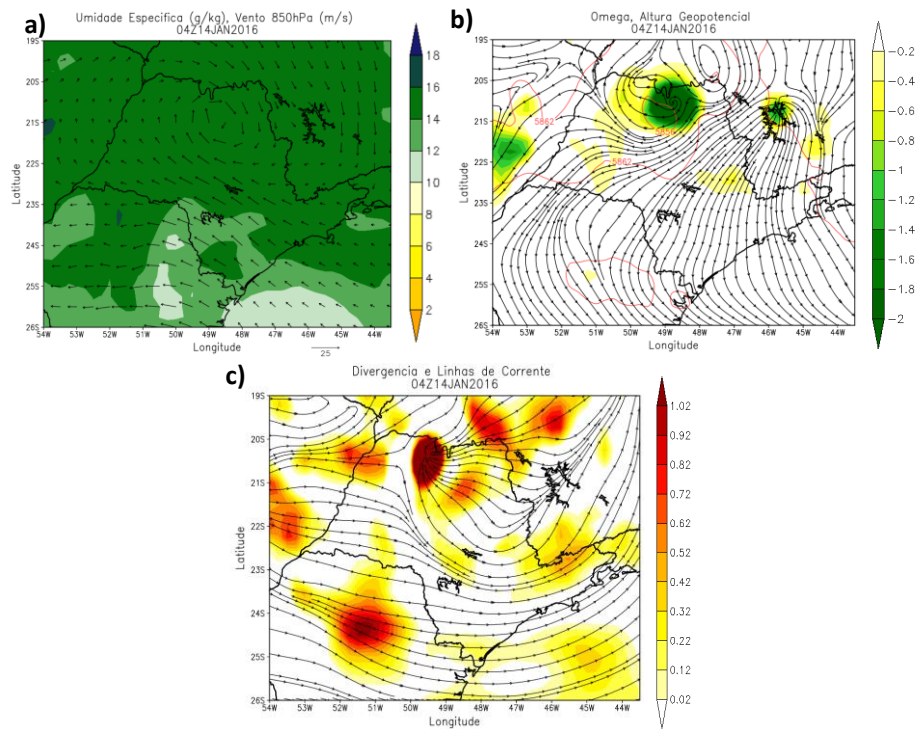
Ao analisar um ambiente mais regional, dando enfoque para o estado de São Paulo, observam-se características dos sistemas meteorológicos que atuam em menores escalas espaciais, como os vórtices ciclônicos de mesoescala. A Figura 13 destaca as imagens de satélite para a região Sudeste do Brasil, onde é possível observar toda a formação do SCM com mais clareza (Figura 13 a, b, c) e a dimensão do sistema, com as convecções mais intensas e com topos das nuvens com temperaturas em torno de $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$. Com a dissipação do SCM, observa-se a atividade convectiva remanescente associada a um VCME (Figura 13 d, e, f). Na Figura 14 é feito um *zoom* dos três campos meteorológicos da Figura 11 para o estado de SP. Nessa figura, torna-se visível uma circulação ciclônica em 850 hPa ao norte do estado (Figura 14a), associada a um máximo de movimento vertical em 500 hPa (Figura 14b) descrito por valores negativos de ω e difluência; e um máximo de divergência em 250 hPa, indicado pelas cores, bem como difluência mostrada pelas linhas de corrente (Figura 14c), representando desta maneira a formação e atuação de um vórtice ciclônico de mesoescala em um ambiente sinótico de ZCAS. Durante a atuação do SCM, horas antes do surgimento do VCME, não foi observado nenhuma circulação ciclônica fechada, porém, conforme observado na Figura 15, o VCME se forma e persiste após a dissipação do sistema convectivo, afirmando o que foi destacado por James e Johnson (2010).

Figura 13 - Imagens do Canal do Infravermelho do Satélite GOES – 13 para os dias: a) 12 às 22Z; b) 13 às 02Z; c) 13 às 10Z; d) 14 às 04Z; e) 14 às 06Z; f) 14 às 08Z.



Fonte: João Pedro Rodrigues da Silva, 2022.

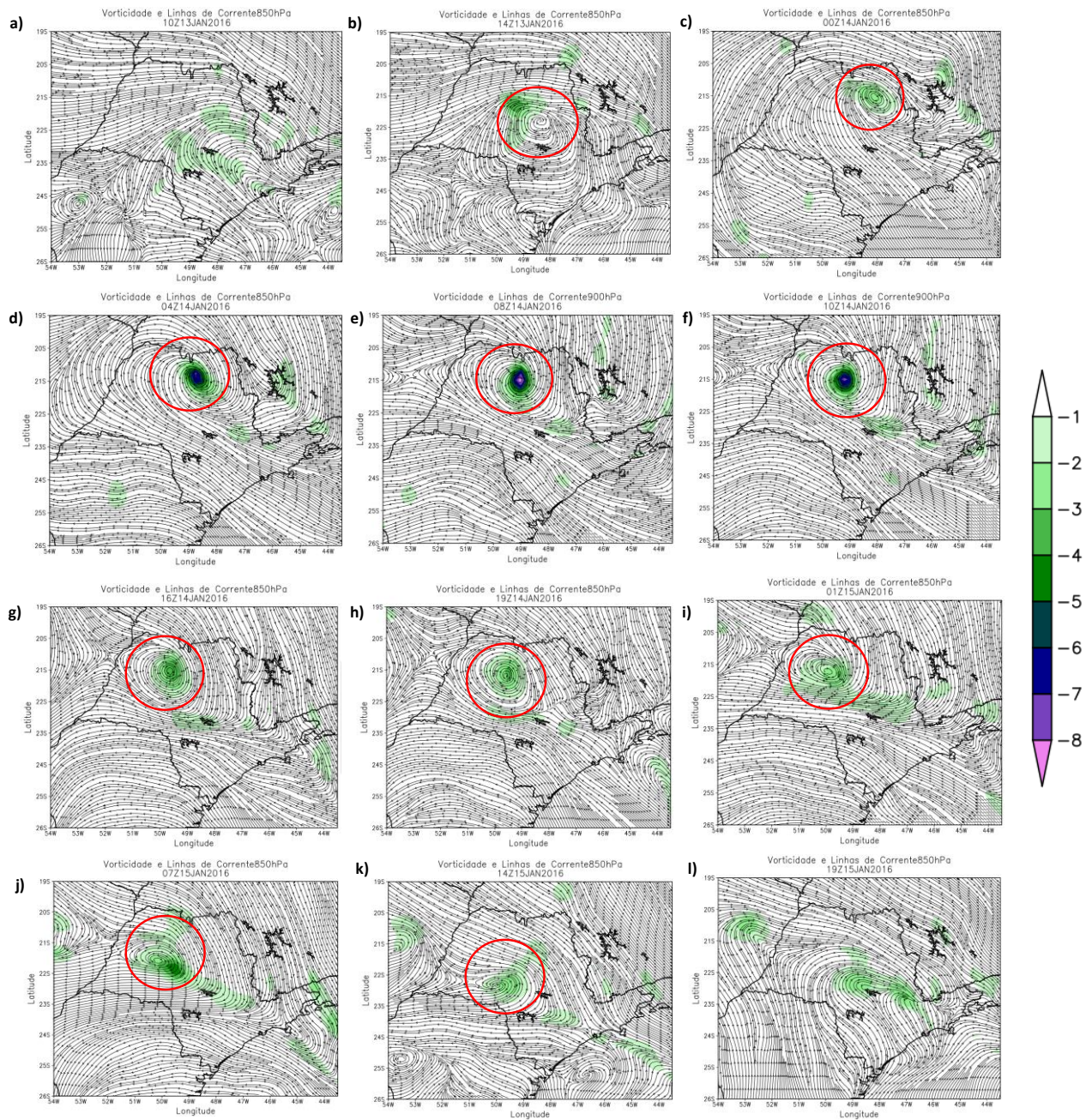
Figura 14 - Campos Sinóticos. a) Umidade Específica (g kg^{-1} , colorido) e vetores do vento (m s^{-1}) em 850 hPa; b) Omega (Pa s^{-1} , colorido), altura geopotencial (m, linhas em vermelho) e linhas de corrente (linhas em preto) em 500 hPa c) Divergência (10^{-5} s^{-1} , colorido) e linhas de corrente em 250 hPa para o dia 14 de janeiro de 2016 às 04 Z.



Fonte: João Pedro Rodrigues da Silva, 2022.

A atuação do vórtice ciclônico de mesoescala é representada no campo de vorticidade relativa e linhas de corrente (Figura 15). O sistema tem seu início no dia 13 às 13Z sobre a região centro-sul do estado de São Paulo (Figura não mostrada) e atinge o máximo tamanho e a máxima intensidade no dia 14 às 08Z, com valores em torno de $-8 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ de vorticidade relativa (Figura 15e) sobre a porção norte do estado. O sistema possui um acoplamento vertical, no entanto, a predominância das menores e, portanto, intensas vorticidades relativas ciclônicas se dá em baixos níveis da atmosfera, entre 850 e 900 hPa, com um máximo de movimento ascendente em toda a coluna atmosférica horas antes do máximo de vorticidade ciclônica. Considerando a Figura 14 esse máximo de movimento ascendente ocorre concomitantemente com a região de convergência em baixos níveis e divergência em altos níveis, favorecendo a ascensão do ar para a própria manutenção do VCME. O sistema enfraquece ao se deslocar para o leste do estado, persistindo na forma de um cavado, tanto em baixos como em médios níveis, no entanto sem a assinatura de vórtice ciclônico

Figura 15 - Vorticidade Relativa (10^{-4} s^{-1} , colorido) e linhas de corrente em: a) 850 hPa no dia 13 às 10Z; b) 850 hPa no dia 13 às 13Z; c) 850 hPa no dia 14 às 00Z; d) 850 hPa no dia 14 às 04Z; e) 850 hPa no dia 14 às 08Z; f) 850 hPa no dia 14 às 10Z; g) 850 hPa no dia 14 às 16Z; h) 850 hPa no dia 14 às 19Z; i) 850 hPa no dia 15 às 01Z; j) 850 hPa no dia 15 às 07Z; k) 850 hPa no dia 15 às 14Z; l) 850 hPa no dia 15 às 19Z de janeiro de 2016

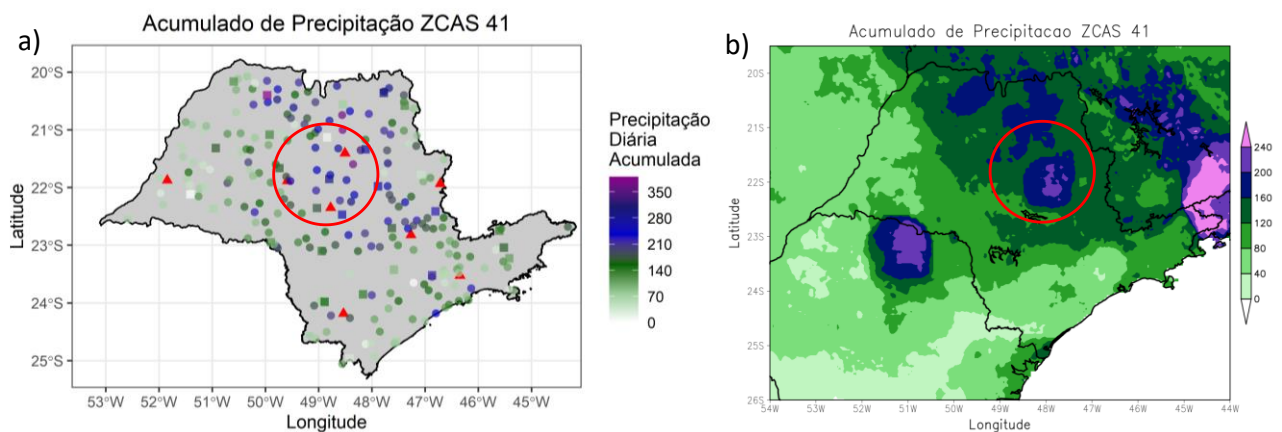


Fonte: João Pedro Rodrigues da Silva, 2022.

Ao acumular a precipitação nos 5 dias do evento de ZCAS (Dia 11, 12, 13, 14 e 15, Figura 16), observam-se valores próximos a 300 mm no conjunto de dados do CHIRPS (Figura 16b) e 350 mm nos conjuntos do INMET e DAEE (Figura 16a), valor que se aproxima e até

ultrapassa a climatologia de precipitação no mês de janeiro para algumas localidades das ocorrências de DNs que estão em torno de 260 – 280 mm (RUV LEMES et al. 2019). Ao comparar a precipitação referente aos dias de ocorrência do VCME (14, 15 de janeiro) com a precipitação de todo o evento de ZCAS nos conjuntos INMET, DAEE e CHIRPS, o VCME contribuiu com 50%, 37% e 40,8% da precipitação, respectivamente. Desta maneira, com exceção do SCM que atuou sobre o estado de SP no dia 13, a precipitação associada aos vórtices ciclônicos representou uma porcentagem expressiva de toda a precipitação do evento de ZCAS. E ao observar as regiões dos maiores acumulados de precipitação, verifica-se que estiveram localizados próximos a 3 das 8 cidades (representadas por triângulos vermelhos dentro dos círculos na Figura 16) onde houve os registros de DNs, sendo possível atribuir ao VCME uma contribuição na ocorrência dos DNs ocasionados por precipitação.

Figura 16 - Acumulado de precipitação durante o evento de ZCAS (11 - 15 de janeiro de 2016) nos conjuntos: a) Precipitação diária do INMET (marcados como quadrados) e Precipitação diária do DAEE (marcados como círculos); b) Precipitação diária do CHIRPS. Os triângulos vermelhos em a) identificam os locais com DNs

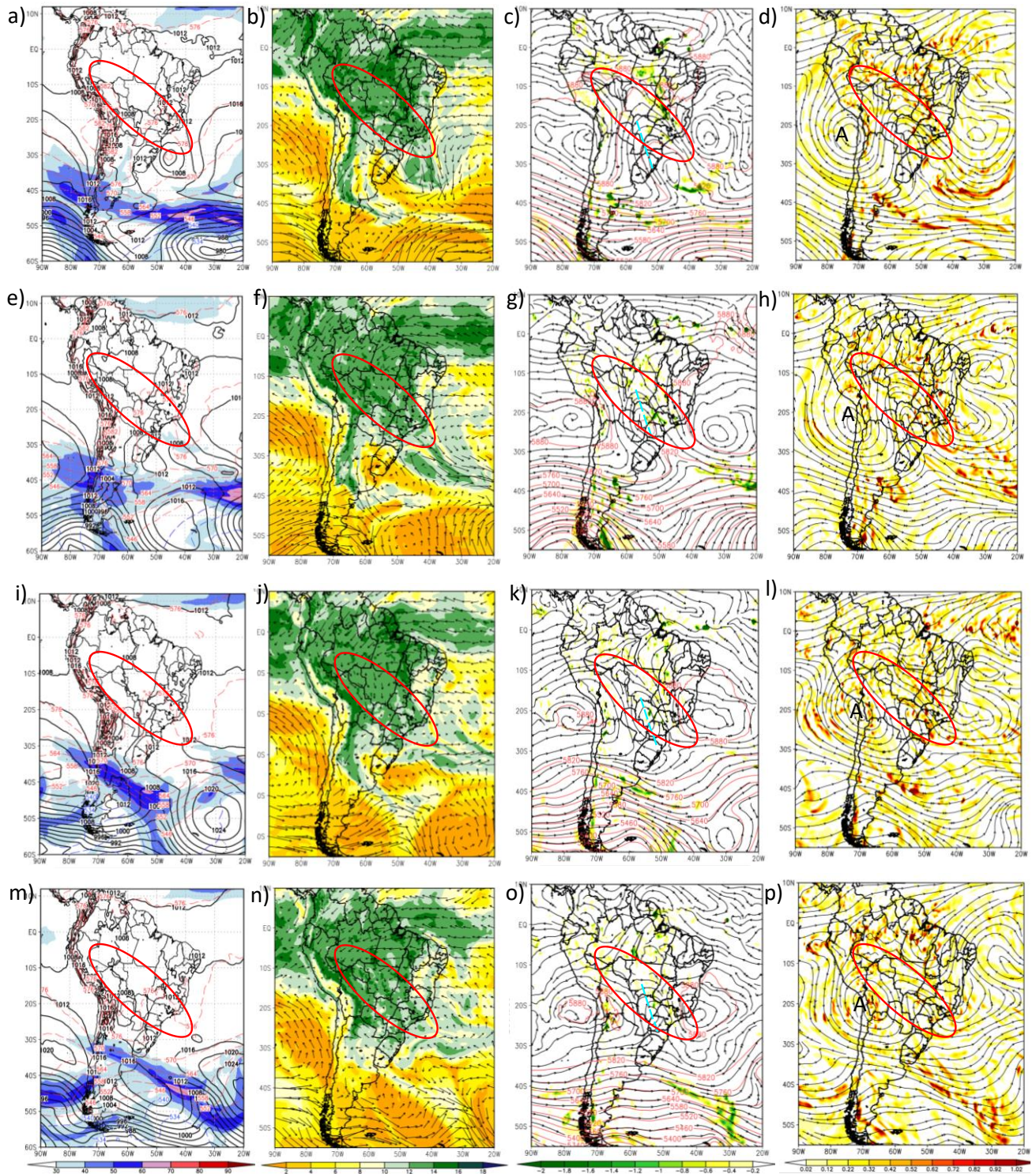


Fonte: João Pedro Rodrigues da Silva, 2022.

5.3 *Estudo de caso do evento de ZCAS 35*

Foi realizado um segundo estudo de caso de um evento de ZCAS ocorrido de 09 a 15 de março de 2015. Esse evento afetou somente uma cidade com DN no estado de São Paulo, sendo registrados pela COBRADE como tempestade local e chuvas intensas no dia 11 de março. A ZCAS (ZCAS 35) teve início no dia 09 de março (Figura não mostrada) sobre o estado de São Paulo com o suporte de um sistema de baixa pressão sobre o oceano Atlântico Subtropical, sendo posteriormente classificado como Tempestade Subtropical CARI pela marinha brasileira. Esse sistema permaneceu durante os primeiros dias da ZCAS, contribuindo para a manutenção do canal de umidade, porém serão destacados na Figura 17 somente os dias 12 a 15 de março devido a atuação do VCME. Comparando a umidade desse evento de ZCAS (Figura 17 b, f, j, n) com a já apresentada (Figura 11) é possível observar que a ZCAS 35 apresentou um transporte de umidade característico da região Amazônica menos intenso (10 a 12 g kg^{-1}) que o da ZCAS 41 (14 a 16 g kg^{-1}). Não foi possível observar uma região com movimento ascendente em 500 hPa em fase com os máximos de umidade em níveis mais baixos da atmosfera, no entanto foi observado um cavado sobre o Sudeste, o que é característico de ZCAS, e sua propagação para leste foi responsável pelo deslocamento da ZCAS para norte, passando a atuar sobre o estado de Minas Gerais. Já no nível 250 hPa apesar da presença da Alta da Bolívia e do cavado do Nordeste, não foi observado regiões com intensas divergências, semelhante ao encontrado no caso da ZCAS 41 (valores em torno de $1 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$). O sistema ciclônico formado no nível de 500 hPa e o cavado 250 hPa próximo ao estado de São Paulo foi caracterizado como o VCME desse evento, não aparecendo exatamente na banda de nebulosidade da ZCAS uma vez que do dia 12 em diante a ZCAS já estava deslocada mais a norte do estado de São Paulo.

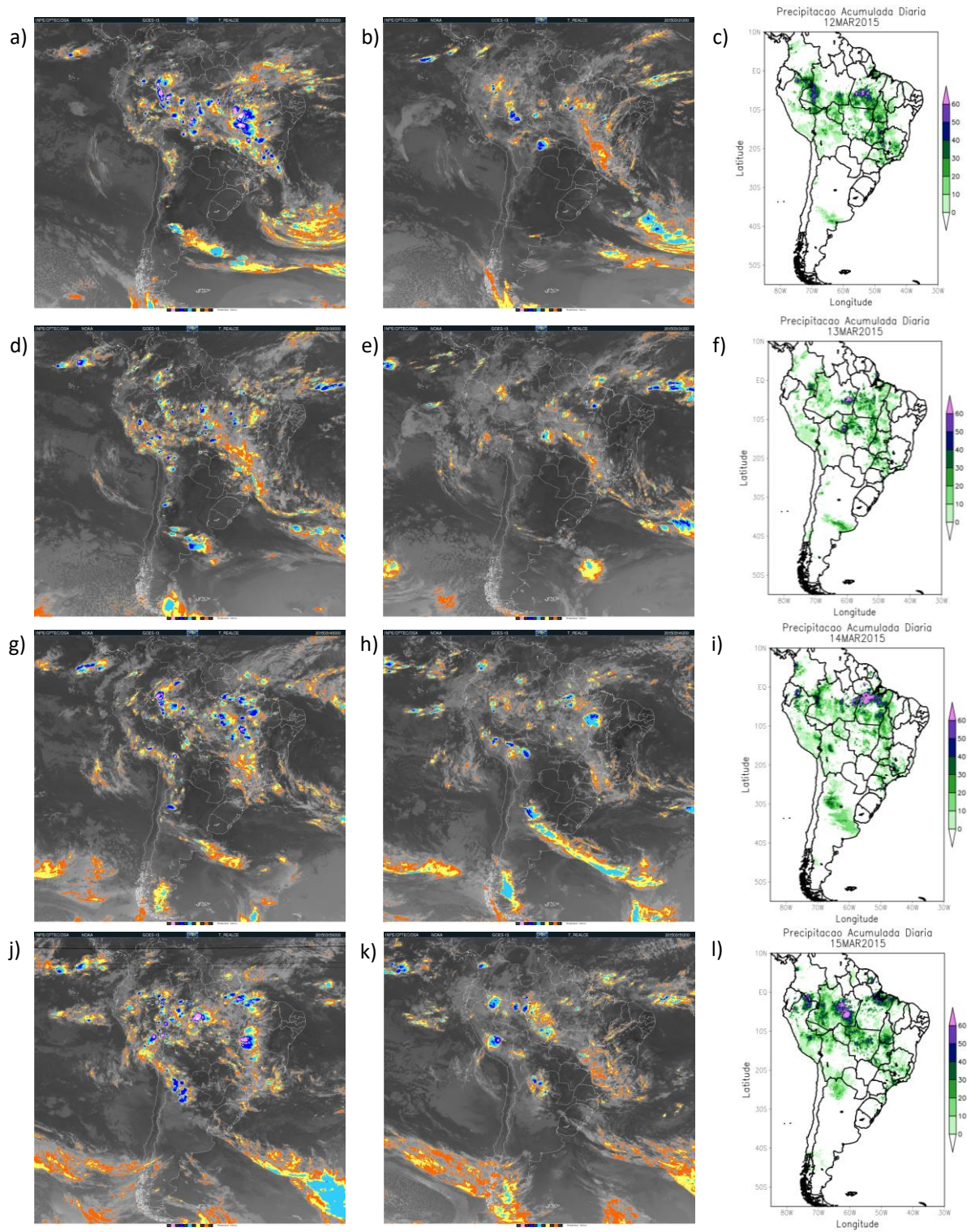
Figura 17 – Campos Sinóticos. A), e), i), m) Pressão a nível médio do mar (hPa, linhas contínuas em preto), Espessura da camada entre 500 e 1000 hPa (Dam, linhas tracejadas em azul e vermelho) e magnitude do vento em 250 hPa (m/s, colorido); b), f), j), n) (Umidade Específica (g kg^{-1} , colorido) e vetores do vento (m s^{-1}) em 850 hPa; c), g), k) o) Omega (Pa s^{-1} , colorido), altura geopotencial (m, linhas vermelhas) e linhas de corrente em 500 hPa; d), h), l), p) Divergência (10^{-5} s^{-1} , colorido) e linhas de corrente em 250 hPa às 00Z para os dias 12, 13, 14 e 15 de março de 2015. Elipse em vermelho indica a região de atuação da ZCAS.



Fonte: João Pedro Rodrigues da Silva, 2022.

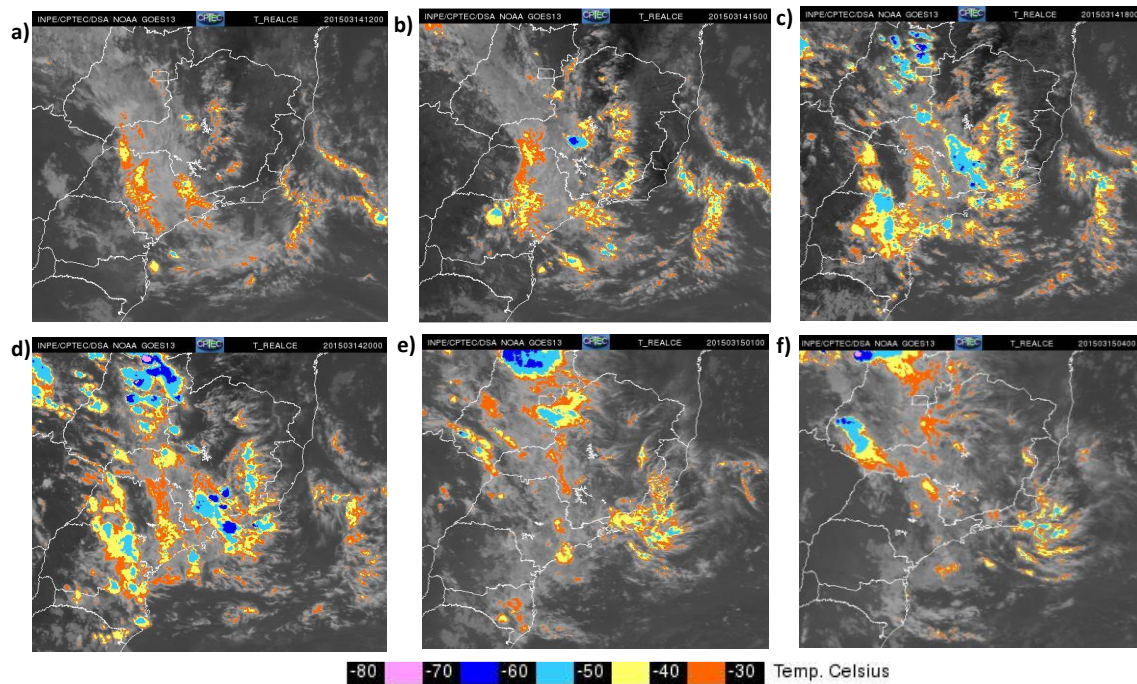
Ao observar as imagens de satélite no canal do infravermelho e precipitação diária acumulada, verifica-se que semelhante ao estudo de caso anterior, essa ZCAS não teve uma banda de nebulosidade bem formada no sentido noroeste-sudeste em todos os dias de atuação da ZCAS, somente nos primeiros dois de atuação. No horário das 00Z do dia 12 (Figura 18a) células convectivas aparecem sobre o norte do estado de SP, estado de Minas Gerais e grande parte da região Norte do Brasil. No litoral da região Sul, o destaque é a atuação da tempestade subtropical CARI, sendo possível observar características da circulação do sistema. O padrão de nebulosidade característico de ZCAS se mantém até dia 13, no entanto, mesmo com a formação do VCME a partir do dia 14 sobre o sudoeste do estado de São Paulo, ao analisar as imagens de satélite em uma escala mais regional (Figura 19), não houve formações de nuvens com atividades convectivas mais intensas sobre o estado e nem mesmo a formação de um sistema convectivo de mesoescala, que geralmente antecede a formação dos vórtices. Ao analisar os campos sinóticos em uma escala espacial menor, enfatizando o estado de São Paulo e as proximidades, em um dos horários de ocorrência do VCME (que iniciou às 12Z do dia 14 e durou até meados do dia 16, porém foi apresentado somente até o dia 15), é possível verificar a presença de uma circulação ciclônica se estendendo desde os altos níveis (Figura 20c) até médios níveis (Figura 20b) da atmosfera, porém comparando com o VCME do estudo de caso anterior, o VCME do estudo de ZCAS 35 não esteve associado a um máximo de movimento vertical em médios níveis, como também não é encontrada a presença de uma intensa divergência nos níveis de 250 hPa.

Figura 18 – Imagens do Canal do Infravermelho do Satélite GOES – 13 para os dias 12, 13, 14 e 15 de março de 2015 nos horários da 00Z (a, d, g, j) e 12Z (b, e, h, k), respectivamente, e a precipitação acumulada (mm) do programa CHIRPS nos mesmos dias (c, f, i, l).



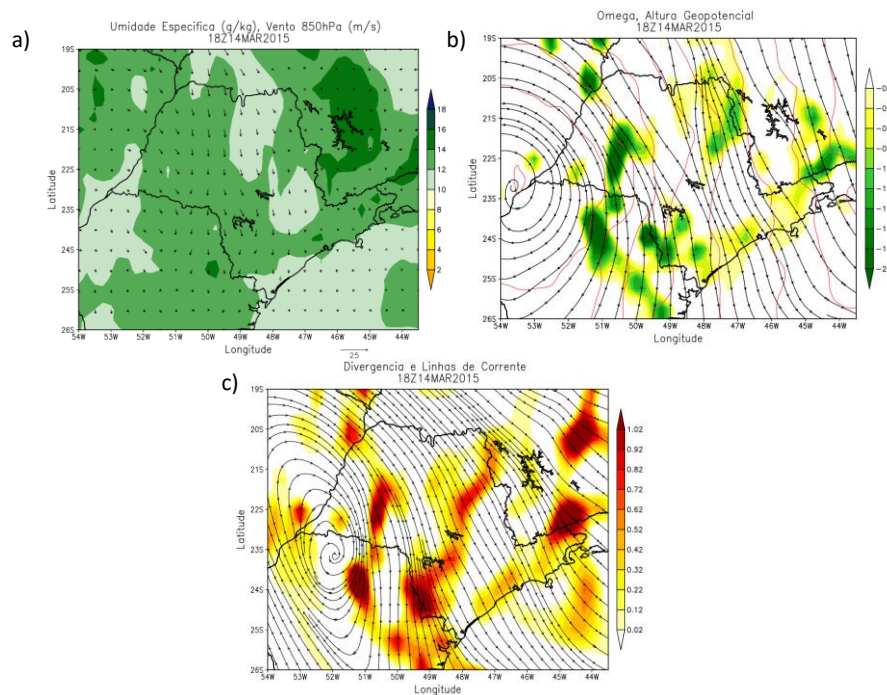
Fonte: João Pedro Rodrigues da Silva, 2022.

Figura 19 - Imagens do Canal do Infravermelho do Satélite GOES – 13 para os dias: a) 14 às 12Z; b) 14 às 15Z; c) 14 às 18Z; d) 14 às 20Z; e) 15 às 01Z; f) 15 às 04Z do mês de março de 2015.



Fonte: João Pedro Rodrigues da Silva, 2022.

Figura 20 - Campos Sinóticos. a) Umidade Específica (g kg^{-1} , colorido) e vetores do vento (m s^{-1}) em 850 hPa; b) Omega (Pa s^{-1} , colorido), altura geopotencial (m, linhas em vermelho) e linhas de corrente (linhas em preto) em 500 hPa c) Divergência (10^{-5} s^{-1} , colorido) e linhas de corrente em 250 hPa para o dia 14 de janeiro de 2016 às 18Z.



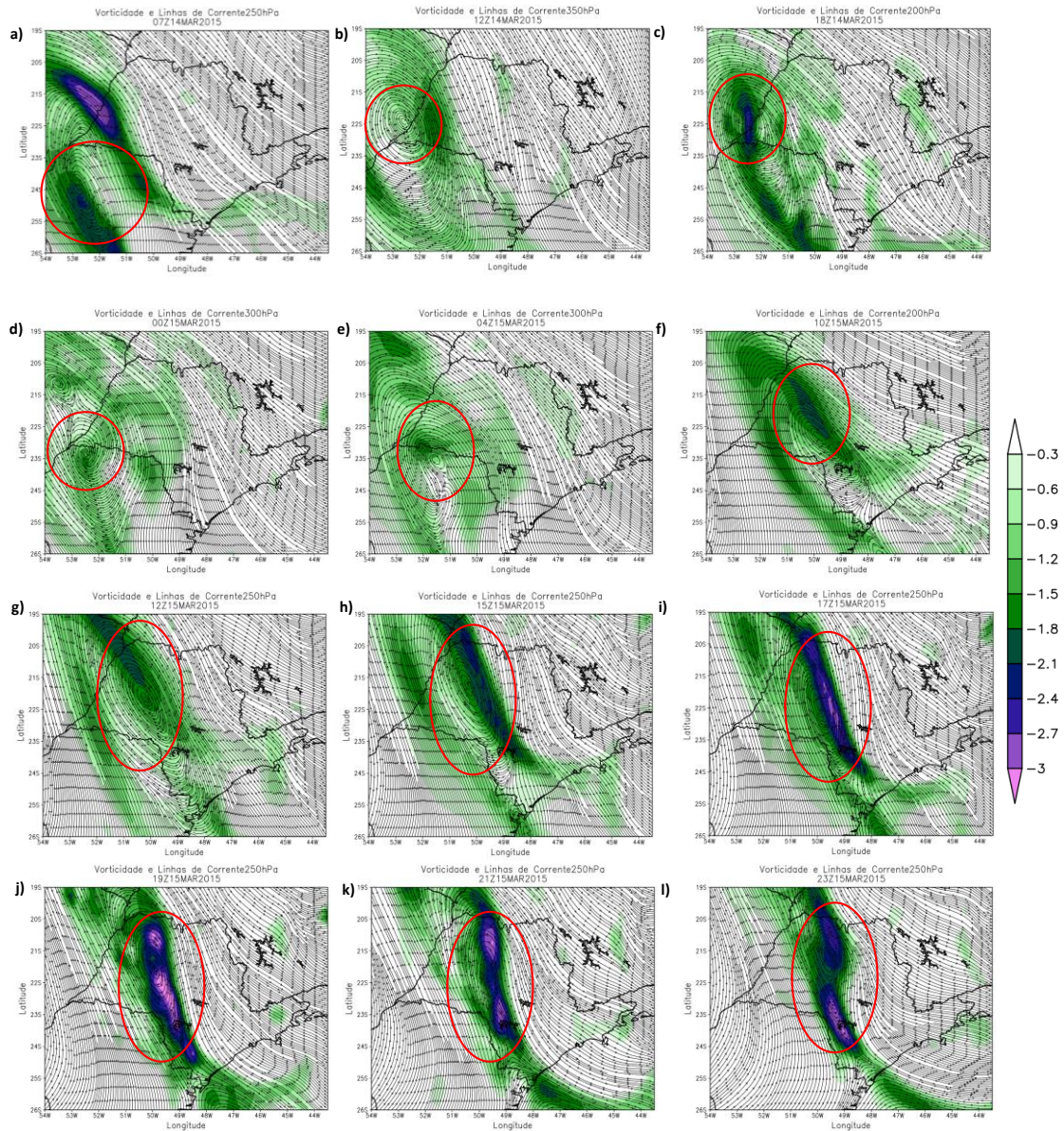
Fonte: João Pedro Rodrigues da Silva, 2022.

Apesar da ZCAS ter se apresentado sobre o estado de São Paulo entre os dias 09 e 10 de março, somente a partir do dia 14 de janeiro que foi observada a atuação do VCME, quando a ZCAS já havia se deslocado para o estado de Minas Gerais. Portanto, nesse evento o VCME foi encontrado posteriormente a passagem da banda de nebulosidade da ZCAS. O VCME teve início nos primeiros horários do dia 14, como um cavado amplificado em altos níveis ao sudoeste do estado de São Paulo associado a vorticidade relativa negativa intensa, com valores em torno de $-3 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ a $-2 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$, nos horários seguintes o sistema já aparece com circulação fechada sendo caracterizado como VCME. O sistema mostrou características diferentes do estudo de caso da ZCAS 41, dentre as principais pode ser destacado o nível vertical atuante, onde o VCME do estudo de caso da ZCAS 35 teve as mínimas vorticidades relativas em níveis mais altos da atmosfera (250 hPa), possuindo um formato alongado, e pelo fato de não ser circular, não foi possível definir um raio para o sistema. O VCME permanece praticamente todo o seu período de atuação sobre a região oeste e central do estado de SP, persistindo até meados do dia 16 (Figura não mostrada).

Ao analisar o acumulado de precipitação do evento de ZCAS (Dia 09, 10, 11, 12, 13, 14, 15, Figura 22) foram observados valores próximos a 75 mm ao Sul o Oeste do estado de SP pelo conjunto CHIRPS e valores superiores a 150 mm nas mesmas localidades pelos conjuntos da rede DAEE e INMET. Ao comparar a precipitação referente aos dias de ocorrência do VCME (14, 15 de janeiro) com a precipitação de todo o evento sobre o oeste do estado de São Paulo, nos conjuntos INMET, DAEE e CHIRPS, o VCME contribuiu com 33%, 18% e 32% da precipitação, respectivamente. Desta maneira, ao analisar os dias de ocorrência do VCME (dias 14 e 15) e os maiores acumulados em cada dia (Figura não mostrada), é possível destacar que os maiores volumes de precipitação ocorridos não estiveram associados diretamente ao VCME, devido a localização do VCME não ser próximo às regiões dos maiores acumulados de precipitação. Outro ponto a ser destacado seria a localização do desastre natural (representadas por triângulos vermelhos na Figura 22), pois apesar da ocorrência do desastre ser na região de atuação do VCME, classificado pelo COBRADE por tempestades locais, o DN foi registrado no dia 11 de março, ou seja, um período anterior a ocorrência do VCME, podendo afirmar que o VCME não apresentou nenhuma relação com a ocorrência do DN.

Figura 21 - Vorticidade Relativa (10^{-4} s^{-1} , colorido) e linhas de corrente em: a) 250 hPa no dia 14 às 07Z; b) 250 hPa no dia 14 às 12Z; c) 250 hPa no dia 14 às 18Z; d) 250 hPa no dia 15 às

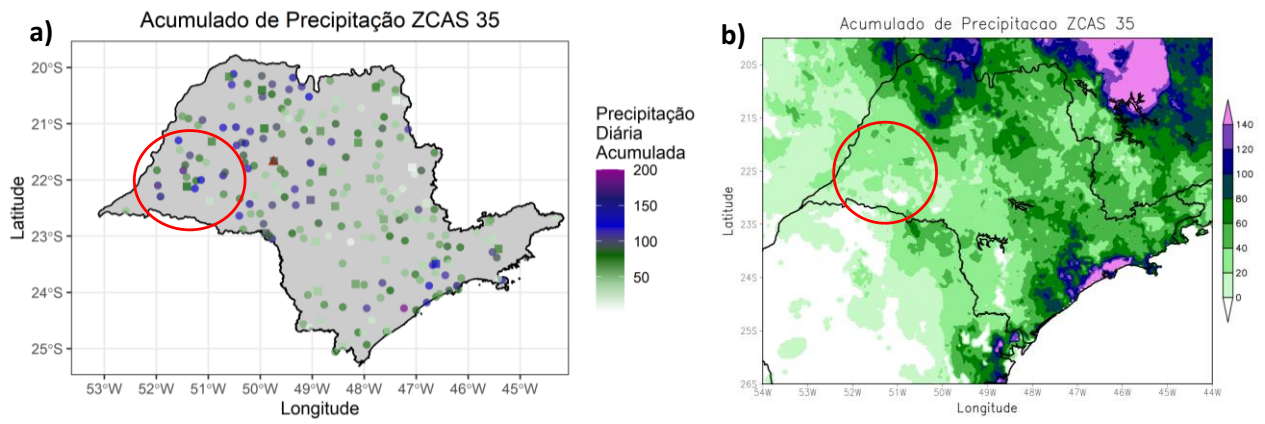
00Z; e) 250 hPa no dia 15 às 05Z; f) 250 hPa no dia 15 às 10Z; g) 250 hPa no dia 15 às 12Z; h) 250 hPa no dia 15 às 15Z; i) 250 hPa no dia 15 às 17Z; j) 250 hPa no dia 15 às 19Z; k) 250 hPa no dia 15 às 21Z; l) 250 hPa no dia 15 às 23Z de janeiro de 2013



Fonte: João Pedro Rodrigues da Silva, 2022.

Figura 22 - Acumulado de precipitação durante o evento de ZCAS (09 - 15 de março de 2015) nos conjuntos: a) Precipitação diária do INMET (marcados como quadrados) e Precipitação

diária do DAEE (marcados como círculos); b) Precipitação diária do CHIRPS. Os triângulos vermelhos em a) identificam os locais com DNs



Fonte: João Pedro Rodrigues da Silva, 2022.

6 Conclusões

6.1 Considerações Finais

Este estudo analisou as ocorrências de vórtices ciclônicos de mesoescala em eventos de ZCAS que estiveram associados aos DNs no estado de São Paulo nos anos de 2013 a 2017 utilizando o conjunto de dados da reanálise ERA5.

Foram contabilizados 62 eventos de ZCAS neste período. O mês com maior frequência de ocorrência foi fevereiro com 12 casos, representando 18% do total casos e o de menor frequência foi maio com apenas dois casos, representando 3% do total. Do total de casos, 28 apresentaram DNs no estado de São Paulo e, destes 28, foram encontrados 10 casos com atuação de VCMEs. Dos 34 eventos restantes que não apresentaram DNs, foram encontradas 31 atuações de VCME, porém com menores intensidades e duração. Por fim, 3 eventos de ZCAS não estiveram associados nem a DN nem a VCME. De maneira geral, com o conjunto de dados da ERA5 foi possível representar e caracterizar os eventos de ZCAS, observando os critérios de Escobar (2019).

Os VCMEs foram separados em dois grupos: 1) VCMEs nos eventos de ZCAS que apresentaram precipitação no local dos VCME e DNs e 2) VCMEs nos eventos de ZCAS que não apresentaram precipitação no local dos VCME e DNs. As características gerais dos eventos podem ser destacadas na Tabela 9, sendo assim, os eventos do grupo 1 se caracterizaram com convergência em baixos níveis e divergência em altos níveis da atmosfera; valores negativos elevados de vorticidade (os mais intensos apresentaram valores inferiores a $-8 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$) e elevados valores de precipitação acumulada (superiores a 300 mm). Os eventos de VCME mais intensos apresentaram os menores valores de vorticidade ciclônica em baixos níveis (850 – 900 hPa), demonstrando uma relação com os maiores acumulados de precipitação e possivelmente com a ocorrência de DNs. Os eventos com maiores durações não demonstram uma relação direta com os maiores acumulados de precipitação nem com a atuação dos VCMEs nos níveis verticais, uma vez que os VCMEs mais duradouros atuaram tanto em baixos como médios níveis, não sendo possível estabelecer um padrão, evidenciando que a duração dos VCMEs pode não ser um fator preponderante para a ocorrência dos DNs. Nos eventos do grupo 2, foram observados uma predominância dos valores negativos de vorticidade em médios e altos níveis, a falta de um padrão no campo de divergência bem estabelecido nos níveis atmosféricos, bem como menores valores no acumulado de precipitação se comparado com os eventos do grupo 1.

Foram selecionados dois eventos de ZCAS para estudo de caso: O primeiro foi o do dia 11 a 15 de janeiro de 2016, o qual esteve associado a elevados valores de precipitação observada, nos três conjuntos de dados utilizados, e 8 cidades com DNs em todo o estado de São Paulo. Os maiores acumulados de precipitação e as maiores atividades convectivas foram observados nos dias 13 e 14 do evento, dias em que se destaca a atuação de um SCM e posteriormente a atuação de um VCME com mínimo de vorticidade relativa nos níveis de 900 e 850 hPa. A partir do perfil vertical de vorticidade relativa é possível afirmar que o vórtice ciclônico permanece acoplado verticalmente durante o período de estudo e através do perfil vertical de divergência e velocidade vertical desses sistemas, verifica-se um comportamento de convergência em baixos níveis e divergência em altos níveis, dando suporte para um movimento ascendente em toda a coluna atmosférica. A precipitação associada aos vórtices ciclônicos representou mais de 37% (considerando a menor porcentagem entre os três conjuntos de dados) de toda a precipitação do evento de ZCAS, com os maiores acumulados de precipitação localizados próximos a 3 das 8 cidades onde houve registros de DNs, sendo possível atribuir aos VCME uma contribuição na ocorrência dos DNs ocasionados por precipitação.

O segundo evento de ZCAS foi o do dia 09 a 15 de março de 2015, o qual esteve associado a menores acumulados de precipitação observada, se comparado a ZCAS 41 e apenas 1 cidade afetada com DNs em todo o estado de São Paulo. Apesar da ZCAS ter atuado desde o dia 09, somente a partir do dia 14 foram observados VCME. Os maiores acumulados de precipitação não estiveram associados diretamente a atuação do VCME, destacando-se que quando o VCME atua em níveis mais altos da atmosfera não foi observada uma relação com a precipitação em superfície. Os perfis verticais de vorticidade e divergência com ômega indicam que o sistema não esteve acoplado verticalmente, com as vorticidades relativas ciclônicas mais intensas predominante somente em altos níveis da atmosfera e com movimentos verticais pouco intensos. A precipitação associada aos vórtices ciclônicos representou aproximadamente 18% (considerando a menor porcentagem entre os três conjuntos de dados) da precipitação de todo o evento sobre o oeste do estado de São Paulo. Apesar do VCME atuar na região de ocorrência do DN, pode-se afirmar que o VCME não apresentou nenhuma relação com a ocorrência do DN, uma vez que ocorreram em dias diferentes.

Diante disso, é importante salientar a contribuição da ZCAS, através do transporte de umidade da região Amazônica e do Oceano Atlântico para o Sudeste do Brasil, a persistência de uma banda de nebulosidade e precipitação, ou seja, uma contribuição em escala sinótica, que acaba favorecendo a ocorrência de eventos de precipitação e posteriormente possíveis DNs. Entretanto, somente as análises na escala sinótica não são suficientes para a compreensão dos

fenômenos que levam a chuvas mais intensas, desta maneira, a análise de sistemas atmosféricos de mesoescala torna-se relevante, pois é possível verificar as causas das precipitações em uma escala considerada regional e até mesmo local.

Tabela 9 - Comparação entre os eventos de ZCAS do grupo 1 e grupo 2.

Grupo 1 - VCME nos eventos de ZCAS com precipitação no local do DN (ZCAS 41)	Grupo 2 - VCME nos eventos de ZCAS sem precipitação no local do DN (ZCAS 35):
Convergência em baixos níveis e divergência em altos níveis;	No geral, não há um padrão de convergência em baixos níveis e divergência em altos níveis;
Movimento ascendente em toda a coluna atmosférica;	Movimento ascendente (não ocorre em toda a coluna atmosférica);
Sistemas acoplados verticalmente;	Sistemas acoplados verticalmente (menos intenso);
VCME circulares com raios entre 50 – 160 km;	VCME alongados (dificuldade em identificar os raios);
Valores negativos elevados de vorticidade relativa ($< -8 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$) em baixos níveis (850 – 900 hPa);	Valores negativos de vorticidade relativa em médios (500 hPa) e altos níveis (250 hPa);
Acumulados de precipitação elevados (>300 mm).	Acumulados de precipitação elevados, porém menores que os eventos do grupo 1.
Relação entre VCME de baixos níveis x precipitação elevada x ocorrência de DN.	Não há relação entre VCME em altos níveis com precipitação.

Fonte: João Pedro Rodrigues da Silva, 2022.

6.2 *Sugestão para trabalhos futuros*

O presente estudo mostrou características de 10 eventos de VCME, o que aponta para a necessidade de analisar mais episódios de ZCAS associados a VCME. Essa análise pode iniciar a partir dos eventos de ZCAS restantes deste trabalho, os quais apresentaram VCME, porém não apresentaram DN. Outra sugestão seria analisar períodos anteriores e posteriores a esse trabalho, com a finalidade de obter mais casos e tentar encontrar padrões comuns entre os VCME. A fim de obter uma melhor filtragem dos eventos, outra sugestão seria selecionar casos de VCME somente associado a banda de nebulosidade da ZCAS, uma vez que neste trabalho foram encontrados VCMEs associados a ZCAS, no entanto o sistema não esteve totalmente embebido na banda de nebulosidade da ZCAS.

Através dos resultados obtidos foi possível concluir que os VCME em altos níveis pouco se associa a precipitação em superfície, desta maneira, sugere-se melhoras no script de detecção dos VCME com o objetivo de realizar as buscas dos VCME nos níveis verticais somente até 500 hPa, que é de fato até onde os VCME mostram alguma relação com a precipitação.

Por fim, como este trabalho foi realizado a partir de análises diagnósticas com dados de reanálise, sugere-se a realização de experimentos com dados de modelos numéricos de previsão do tempo a fim de observar se esses sistemas seriam facilmente previstos, o que enriqueceria as previsões nos centros operacionais.

7 Referências

BARCELLOS, P.C.L., SILVA, F.P., VISSIRINI, F.S.B., MAGALHÃES, C.A., TERRA, J.M., DUTRA, M.R.F., AMARAL, I.C.F. Diagnóstico Meteorológico dos Desastres Naturais Ocorridos nos Últimos 20 Anos na Cidade de Duque de Caxias. **Revista Bras. de Meteorologia**, v. 31, n. 3, 319-329, 2016.

BRASILIANSE, C. S. **Vórtice Ciclônico Híbrido Embebido na ZCAS Associado a um Caso de Chuva Intensa na Bacia do Rio Paraíba Do Sul**. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – UFRJ/CCMN/IGEO/ Programa de Pós Graduação em Meteorologia, Rio de Janeiro, 2016.

BOSART, L. F.; SANDERS, F., 1981. The Johnstown flood of July 1977: A long-lived convective system. **J.Atmos. Sci.** v.38. p. 1616 – 1642.

CARVALHO, L. M. V; JONES, C.; LIEBMANN, B. The South Atlantic convergence zone: Intensity, form, persistence, and relationships with intraseasonal to interannual activity and extreme rainfall. **Journal of Climate**, v. 17, p. 88–108, 2004.

CASTRO, A.L.C. **Glossário de defesa civil: estudo de riscos e medicina de desastres**. Brasília, MPO/Departamento de Defesa Civil. 283 p. 1998.

Coordenadoria de Educação Ambiental (CEA), **8º Caderno de Educação Ambiental – Desastres Naturais**. Secretaria do Meio Ambiente do Estado de São Paulo, 2014.

CLASSIFICAÇÃO E CODIFICAÇÃO BRASILEIRA DE DESASTRES - COBRADE. 2012.

CHEN, SJ; KUO, YH; WANG, W; TAO, ZY; CU, B. A modeling case study of heavy rainstorms along the Mei-Yu front. **Mon Wea Rev**, V. 126 , P. 2330 – 2351. 1998.

DAVIS, C.; ATKINS, N; BARTELS, D; BOSART, L.; CONIGLIO, M.; BRYAN, G.; COTTON, W; DOWELL, D.; JEWETT, B.; JOHNS, R.; JORGENSEN, D.; KNIEVEL, J; KNUPP, K., LEE, W.C.; G. MCFARQUHAR, G.; MOORE, J.; PRZYBYLINSKI, R; RAUBER, R.; SMULL, B.; TRAPP, R.; TRIER, S.; WAKIMOTO, R.; WEISMAN, M.; ZIEGLER, C. The Bow Echo and MCV Experiment. Observations and opportunities. **Bull. Amer. Meteor. Soc.**,85, 1075-1093, 2004.

DURÁN-QUESADA, A. M.; REBOITA, M. S.; GIMENO, L. Precipitation in tropical America and the associated sources of moisture: a short review. **Hydrological Sciences Journal**, Rennes, v. 57, p.1-13, 2012.

EM-DAT – Emergency Events Database. The OFDA/CRED International Disaster Database. Disponível em: <<http://www.em-dat.net/>>. Acesso em: 18 nov. 2019.

ESCOBAR, G.C.J.; COSTA, I.C. Situações meteorológicas associadas a episódios da Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS). In: **IX CONGRESO ARGENTINO DE METEOROLOGIA**, Buenos Aires, 2005. Anais do IX CONGRESO ARGENTINO DE METEOROLOGIA.

ESCOBAR, G.C.J. Zona De Convergência Do Atlântico Sul (Zcas): Critério De Detecção Para Uso Em Centros Operacionais De Previsão De Tempo. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE, São Jose dos Campos, 2019.

FUNK, C.; PETERSON, P.; LANDSFELD, M.; PEDREROS, D.; VERDIN, J.; SHRADDHANAND, S.; HUSAK, G.; ROWLAND, J.; HARRISON, L.; HOELL, A.; MICHAELSEN, J. The climate hazards infrared precipitation with stations - a new environmental record for monitoring extremes. **Scientific Data**, 2015.

GAN, M.A.; KOUSKY, V.E.; ROPELEWSKI, C.F. The South America Monsoon Circulation and Its Relationship to Rainfall over West-Central Brazil. **Journal of Climate**. V 17, p. 47 – 66, 2004.

HERDIES, D. L.; DA SILVA A.; SILVA DIAS M.A.F. ; FERREIRA R.N. The moisture budget of the bimodal pattern of the summer circulation over South America. **Journal of Geophysical Research**, Washington-DC, v. 107, n. D20, p. 42-1-42-10, 2002.

HERSBACH, H; DEE, D., ERA5 reanalysis is in production, **ECMWF Newsletter**. No. 147, v.7, 2016.

HERSBACH, H., BELL, B., BERRISFORD, P., HORÁNYI, A. SABATER, J. M., NICOLAS, J. RADU, R., SCHEPERS, D., SIMMONS, A., SOCI, CORNEL., DEE, D. Global reanalysis: goodbye ERA-Interim, hello ERA5. **ECMWF Newsletter**. N° 15, p.17-24, 2019.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Área Territorial Brasileira, Rio de Janeiro: IBGE, 2021

JAMES, E. P.; JOHNSON, R.H. Patterns of precipitation and mesoscale evolution in midlatitude mesoscale convective vortices. **Mon. Wea. Rev.**, **138**, 909–931, 2010.

KODAMA, Y. Large-scale common features of Sub-tropical Precipitation Zones (the Baiu Frontal Zone, the SPCZ, and the SACZ). Part I: characteristics of Subtropical Frontal Zones. **Journal of Meteorological Society of Japan**, v. 70, n. 4, p. 813-835, 1992.

KODAMA, Y. Large-Scale Common Features of Subtropical Convergence Zones (The Baiu Frontal Zone, The SPCZ, and the SCAZ). Part II: Conditions of the Circulation for Generating the STCZs. **Journal of Meteorological Society of Japan**, v. 71, p. 581-610, 1993.

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

LENTERS, J.D.; K.H. COOK. Summertime precipitation variability over South America: Role of the large-scale circulation. **Monthly Weather Review**. n.127, p. 409-431, 1999.

MARCELINO, E. V. **Desastres Naturais e Geotecnologias: Conceitos Básicos**. Caderno Didático nº 1. INPE/CRS, Santa Maria, 2008.

MARCELINO, E. V.; NUNES, L. H.; KOBIYAMA, M. Banco de dados de desastres naturais: análise de dados globais e regionais. **Caminhos de Geografia**, v.6, n.19, p. 130-149, 2006.

MARENGO, J. A.; LIEBMANN, B.; KOUSKY, V.; FILIZOLA, N. WAINER, I. On the onset and end of the rainy season in the Brazilian Amazon Basin. **Journal of Climate**, v.14, p. 833-853, 2001.

MARENGO, J.A.; SOARES, W.R.; SAULO, C.; NICOLINI, M. Climatology of the low-level jet east of the Andes as derived from the NCEP-NCAR reanalyses: Characteristics and temporal variability. **Journal of Climate**. v.17, p. 2261-2280, 2004.

MARENGO, J.A.; LIEBMANN, B.; GRIMM, A.M.; MISRA, V.; SILVA DIAS, P. L.; CAVALCANTI, I.F.A.; CARVALHO, L. M.V.; BERBERY, E.H.; AMBRIZZI, T.; VERA, C.S.; SAULO, A.C.; NOGUES-PAEGLE, J.; ZIPSER, E.; SETH, A.; ALVES, L.M. Recent developments on the South American monsoon system. **International Journal of Climatology**, v. 32, p. 1–21, 1 jan. 2012.

NINOMIYA, K. Similarity and difference between the South Atlantic Convergence Zone and the Beiu Frontal Zone simulated by an AGCM. **J Meteorol Soc Jpn**, v. 85, p. 277 – 299, 2007.

NOGUÉS-PAEGLE, J.; MO, K. C. Alternating wet and dry conditions over South America during summer. **Monthly Weather Review**, vol. 125, p. 279-291, 1997.

NOGUÉS PAEGLE, J.; MECHOSO, C. R.; e coautores. Progress in Pan America CLIVAR Research: Understanding the South American Monsoon. **Meteorologica**, v. 27, p. 3-30, 2002.

PEREIRA FILHO, A. J.; HAAS, R.; AMBRIZZI, T. Caracterização de eventos de enchentes na bacia do Alto Tietê por meio do radar meteorológico e da modelagem numérica de mesoescala. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 12, 2002, Foz do Iguaçu, PR, CD-ROM.

PLANA JUNIOR, Paulo Eduardo. **A contribuição do JBNAS para a precipitação em um episódio de ZCAS: análises físicas e simulações com o modelo WRF**. 2021. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) - Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2021.

Quadro MFL. **Estudos de episódios de Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) sobre a América do Sul**. 1994. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE. São José dos Campos, São Paulo, 1994.

QUADRO, M.F.L. **Estudo de Vórtices Ciclônicos de Mesoescala associados à Zona de Convergência do Atlântico Sul**. 2012. 141 f. Tese (Doutorado em Meteorologia) - Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2012.

QUADRO, M, F. L.; SILVA DIAS, M. A. F.; HERDIES, D. L. Análise de um Vórtice Ciclônico de Mesoescala Associado à ZCAS em Janeiro de 2009. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 31, p. 273-287, 2016.

RAMAGE, C. S. Monsoon meteorology. **Academic Press**, New York, 296p, 1971.

REBOITA, M. S.; GAN, M. A.; ROCHA, R. P.; AMBRIZZI, T. Regimes de precipitação na América do Sul: uma revisão bibliográfica. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 25, n. 2, p. 185-204, 2010.

REBOITA, M.S.; AMBRIZZI, T.; SILVA, B.A.; PINHEIRO, R.F.; ROCHA, R.P. The South Atlantic subtropical anticyclone: Present and future climate. **Frontiers in Earth Sciences**, v. 7, n. 8, p. 1-15, 2019.

ROSA, E. B.; Pezzi, L.P.; Quadro, M.F.L; Brunsell, N. Automated Detection Algorithm for SACZ, Oceanic SACZ, and Their Climatological Features. **Frontiers In Environmental Science**, v. 18, 15 p. 2020.

RUV LEMES, M.C.; REBOITA, M.S.; TORRES, R.R. Elementos Fisiográficos e a Precipitação no Estado de São Paulo. IN: Simpósio Brasileiro de Geografia Física Aplicada, XVIII. **Anais[...]**, Fortaleza – CE. 2019.

SACRAMENTO NETO, O. B.; ESCOBAR, G. C. J.; DIAS DA SILVA, P. E., 2010. Método objetivo para identificar episódios de Zonas de Convergência de Umidade (ZCOU) no ambiente operacional do Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos – CPTEC. In: XVI Congresso Brasileiro de Meteorologia, Belém – PA. **Anais do XIV Congresso Brasileiro de Meteorologia**. SBMET, 2010.

SILVA, L. J; REBOITA, M. S; ROCHA, R. P. Relação da Passagem de Frentes Frias na Região Sul de Minas Gerais (RSMG) com a Precipitação e Eventos de Geada. **Revista Brasileira de Climatologia**, v.14, n. 10, p.229-246, 2014.

SILVA, J, P, R.; REBOITA, M, S.; ESCOBAR, G, C, J. Caracterização da Zona de Convergência do Atlântico Sul em campos atmosféricos recentes. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 25, 2019.

SOUZA, W. M. **Impactos Socioeconômicos e Ambientais dos Desastres Associados as Chuvas na Cidade do Recife-PE**. Tese (Doutorado em Recursos Naturais) - Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande/PB, 121 p., 2011.

SOUZA, W. M.; AZEVEDO, P. V.; ARAÚJO, L. E. Classificação da Precipitação Diária e Impactos Decorrentes dos Desastres Associados as Chuvas na Cidade do Recife-PE. **Revista Brasileira de Geografia Física**, n. 2, p. 250-268, 2012.

STENSRUD, D. J. Importance of low-level jets to climate: A Review., 1996.

SUGAHARA, S.; DA ROCHA, R.P.; YNOUE, R.Y.; DA SILVEIRA, R.B. Homogeneity assessment of a station climate series (1933-2005) in the Metropolitan Area of São Paulo: instruments change and urbanization effects. **Theor. Appl. Climatol.**, v. 107, n. 3-4, p. 361-374, 2012.

TEIXEIRA, M. S.; SATYAMURTY, P. Episódios de chuvas intensas na região sul do Brasil. Parte I: configuração sinópticas associadas. In: XIII CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, **Anais[...]**, Fortaleza, 2004.

VERA, C.; BAEZ, J.; DOUGLAS, M; EMMANUEL, C.B.; MARENGO, J.; MEITIN, J.; NICOLINI, M.; NOGUES-PAEGLE, J.; PAEGLE, J.; PENALBA, O.; SALIO, P. SAULO, C.; SILVA DIAS, M.A.; SILVA DIAS P.L.; ZIPSER, E. The South American Low-Level Jet Experiment, *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, 87, 63– 77, 2006.

WMO n° 1186, 2003. **Guidelines on Climate Metadata and Homogenization**. Secretariat of the World Meteorological Organization, Geneva, 2003.

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 - Figuras referentes a todos os casos de ZCAS analisados no estudo

Figura A.1 – Vorticidade Relativa (10^{-4} s^{-1} , colorido) e linhas de corrente em: a) 600 hPa no dia 10 às 00Z; b) 600 hPa no dia 10 às 01Z; c) 450 hPa no dia 10 às 03Z; d) 500 hPa no dia 10 às 04Z; e) 450 hPa no dia 10 às 05Z; f) 450 hPa no dia 10 às 06Z; g) 450 hPa no dia 10 às 07Z; h) 600 hPa no dia 10 às 08Z; i) 600 hPa no dia 10 às 09Z; j) 600 hPa no dia 10 às 10Z; k) 600 hPa no dia 10 às 11Z; l) 600 hPa no dia 10 às 12Z de janeiro de 2013

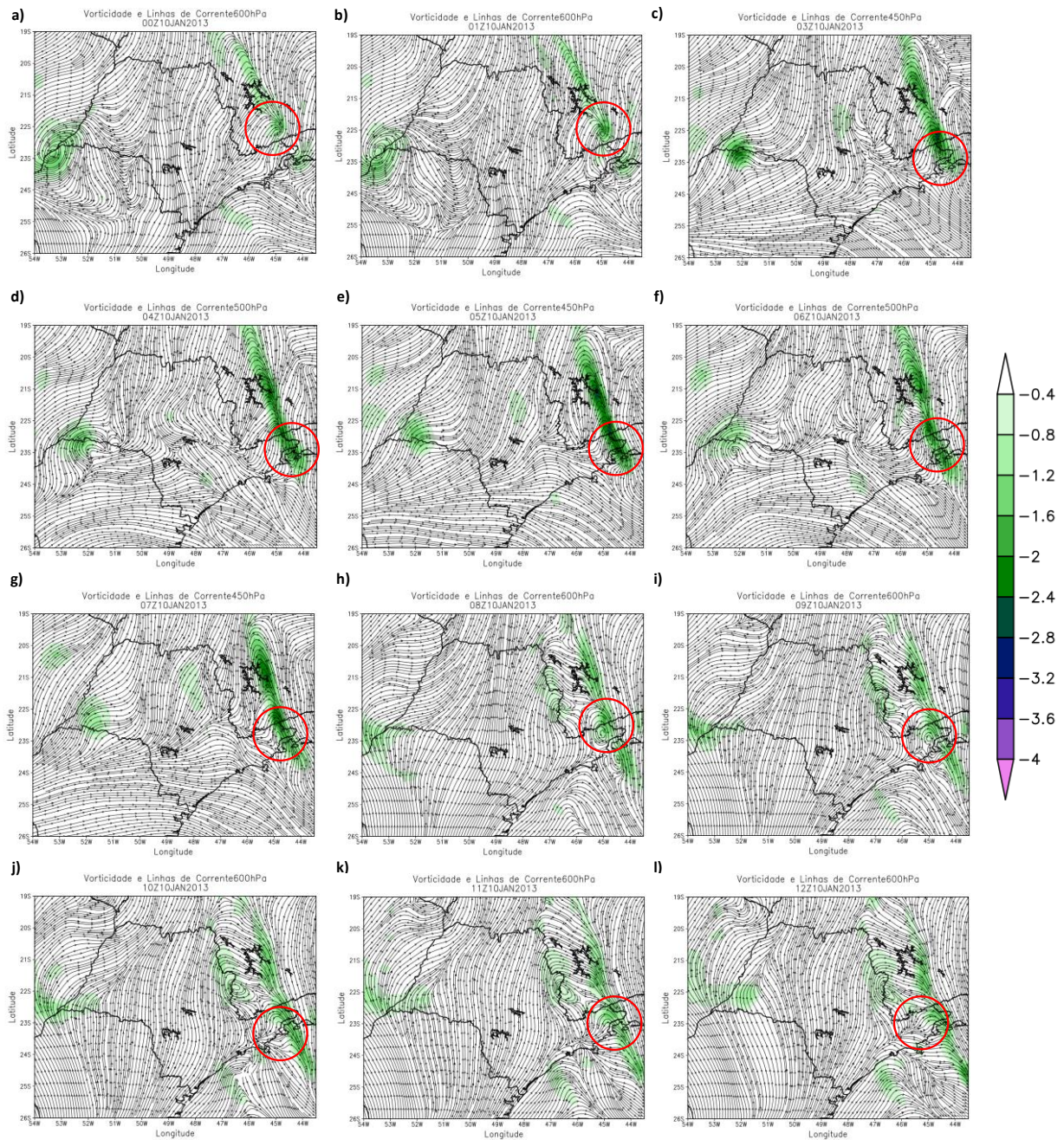


Figura A.2 – Acumulado de precipitação durante o evento de ZCAS (10 - 17 de janeiro de 2013) nos conjuntos: a) Precipitação diária do INMET (marcados como quadrados) e Precipitação diária do DAEE (marcados como círculos); b) Precipitação diária do CHIRPS. Os triângulos vermelhos em a) identificam os locais com DNs

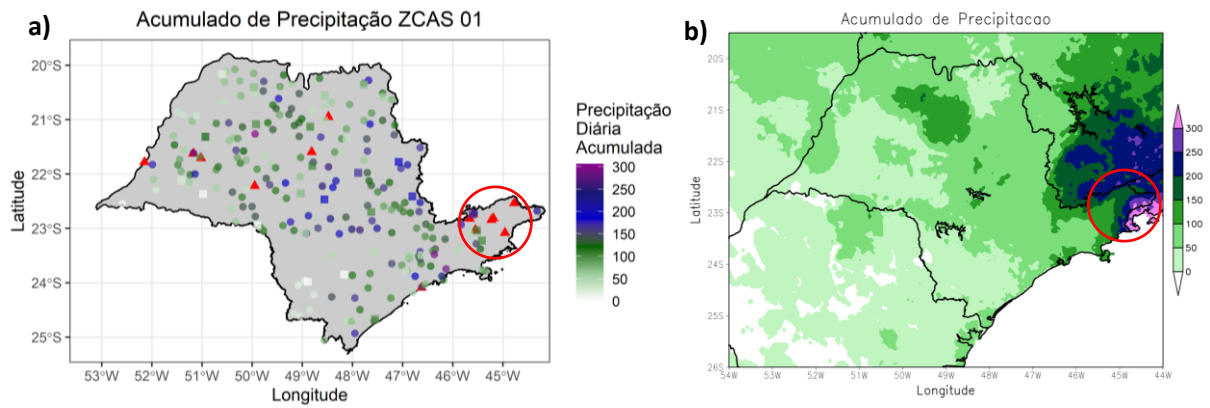


Figura A.3 - Vorticidade Relativa (10^{-4} s^{-1} , colorido) e linhas de corrente em: a) 700 hPa no dia 27 às 13Z; b) 700 hPa no dia 27 às 15Z; c) 750 hPa no dia 27 às 21Z; d) 850 hPa no dia 28 às 00Z ; e) 750 hPa no dia 28 às 02Z; f) 650 hPa no dia 28 às 06Z; g) 700 hPa no dia 28 às 10Z; h) 700 hPa no dia 28 às 13Z; i) 750 hPa no dia 28 às 16Z; j) 700 hPa no dia 28 às 17Z; k) 750 hPa no dia 28 às 21Z; l) 750 hPa no dia 28 às 23Z de janeiro de 2013

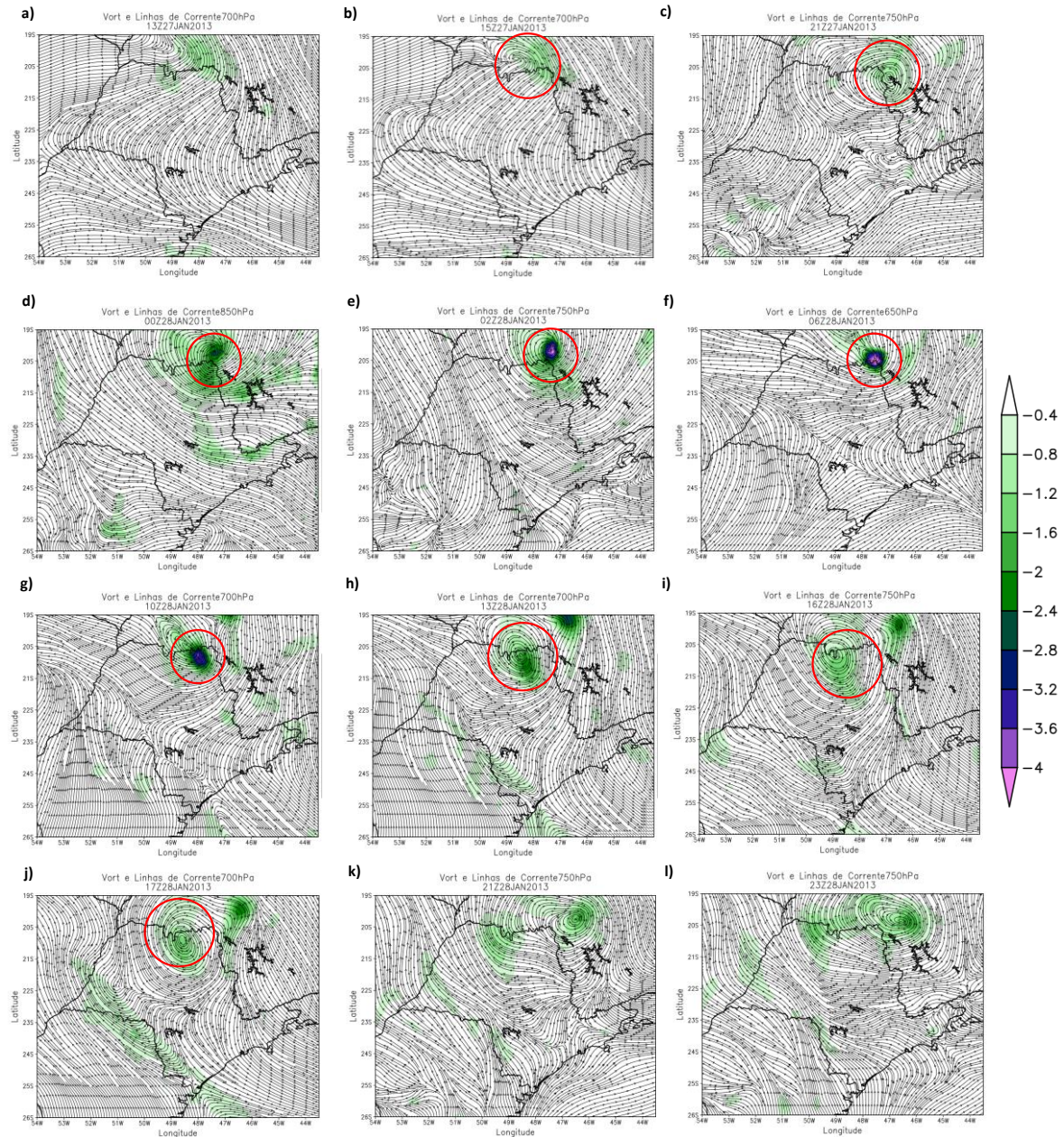


Figura A.4 – Acumulado de precipitação durante o evento de ZCAS (26 - 28 de janeiro de 2013) nos conjuntos: a) Precipitação diária do INMET (marcados como quadrados) e Precipitação diária do DAEE (marcados como círculos); b) Precipitação diária do CHIRPS. Os triângulos vermelhos em a) identificam os locais com DNs

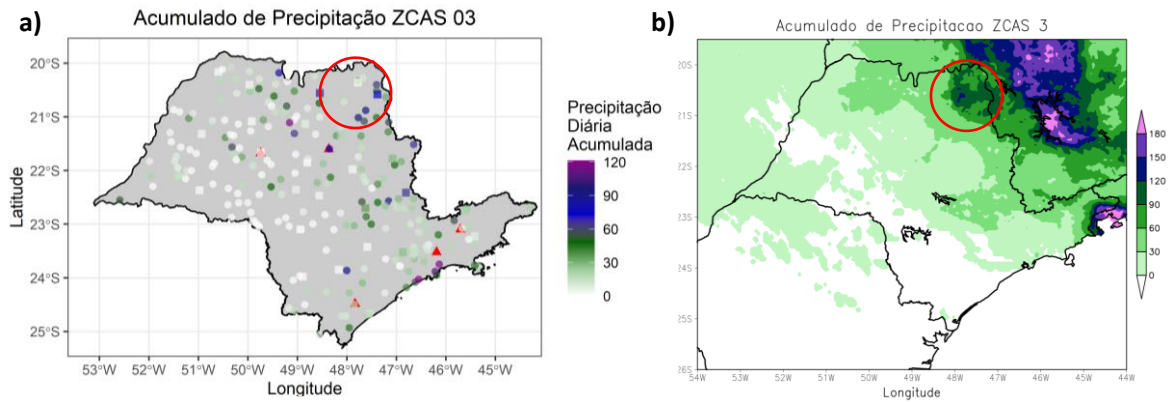


Figura A.5 – Vorticidade Relativa (10^{-4} s^{-1} , colorido) e linhas de corrente em: a) 750 hPa no dia 11 às 05Z; b) 750 hPa no dia 11 às 06Z; c) 750 hPa no dia 11 às 07Z; d) 750 hPa no dia 11 às 08Z; e) 750 hPa no dia 11 às 09Z; f) 800 hPa no dia 11 às 10Z; g) 900 hPa no dia 11 às 11Z; h)

900 hPa no dia 11 às 12Z; i) 900 hPa no dia 11 às 13Z; j) 750 hPa no dia 11 às 14Z; k) 750 hPa no dia 11 às 15Z; l) 750 hPa no dia 11 às 16Z de dezembro de 2013

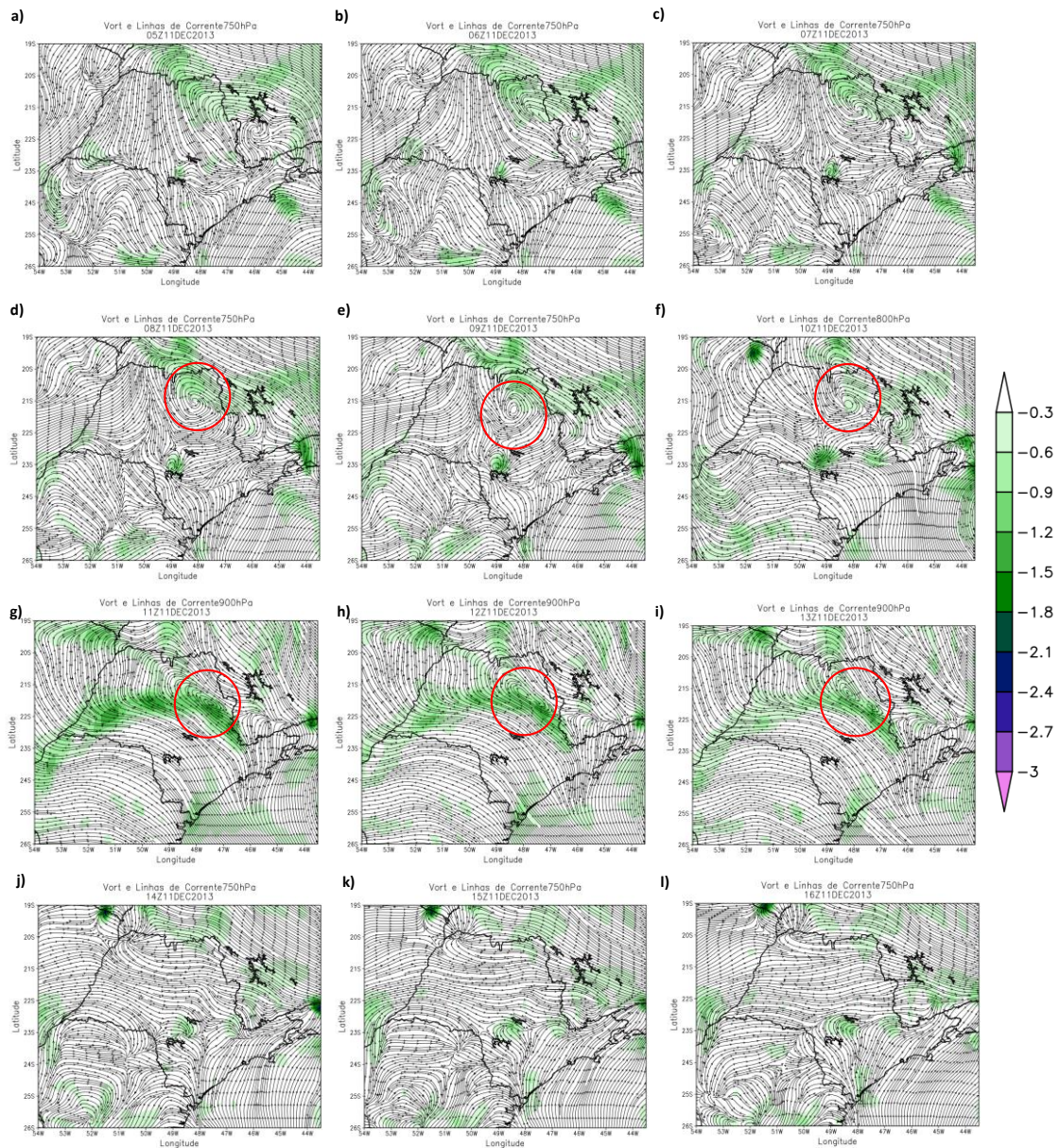


Figura A.6 - Acumulado de precipitação durante o evento de ZCAS (11 - 13 de dezembro de 2013) nos conjuntos: a) Precipitação diária do INMET (marcados como quadrados) e

Precipitação diária do DAEE (marcados como círculos); b) Precipitação diária do CHIRPS. Os triângulos vermelhos em a) identificam os locais com DNs

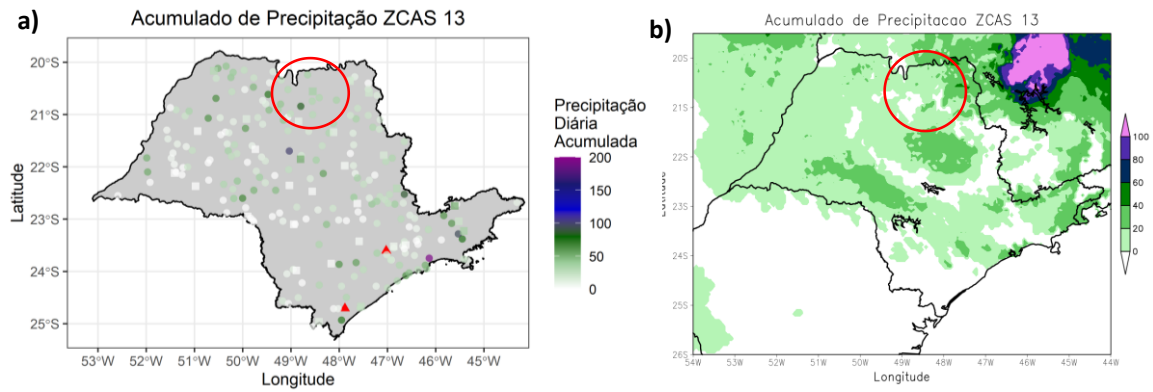


Figura A.7 – Vorticidade Relativa (10^{-4} s^{-1} , colorido) e linhas de corrente em: a) 650 hPa no dia 15 às 07Z; b) 700 hPa no dia 15 às 08Z; c) 700 hPa no dia 15 às 09Z; d) 650 hPa no dia 15 às 10Z; e) 750 hPa no dia 15 às 12Z; f) 950 hPa no dia 15 às 14Z; g) 950 hPa no dia 15 às 16Z; h)

750 hPa no dia 15 às 18Z; i) 750 hPa no dia 15 às 20Z; j) 700 hPa no dia 15 às 22Z; k) 700 hPa no dia 15 às 23Z; l) 700 hPa no dia 16 às 00Z de fevereiro de 2014.

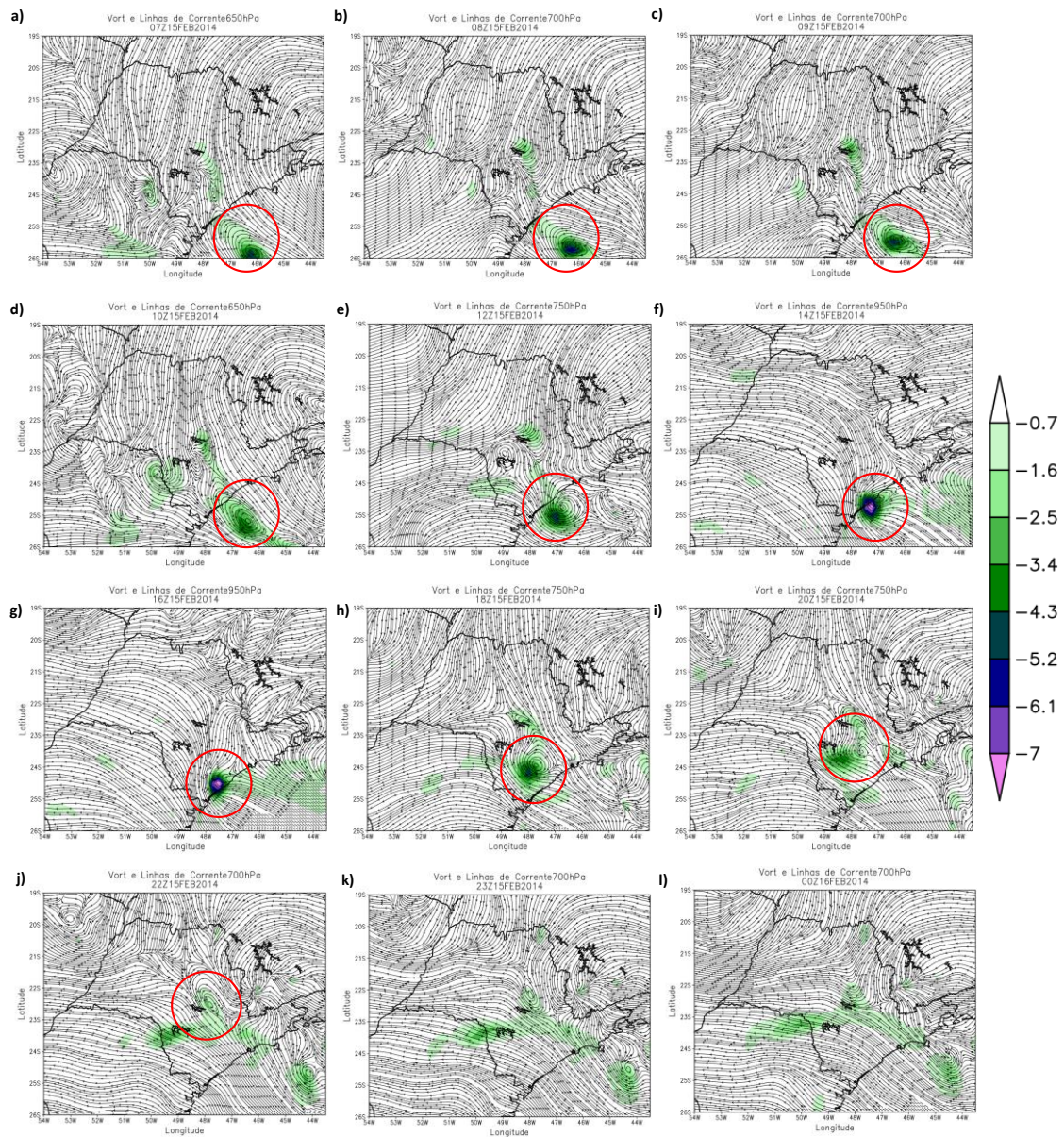


Figura A.8 - Acumulado de precipitação durante o evento de ZCAS (15 - 19 de fevereiro de 2014) nos conjuntos: a) Precipitação diária do INMET (marcados como quadrados) e

Precipitação diária do DAEE (marcados como círculos); b) Precipitação diária do CHIRPS. Os triângulos vermelhos em a) identificam os locais com DNs

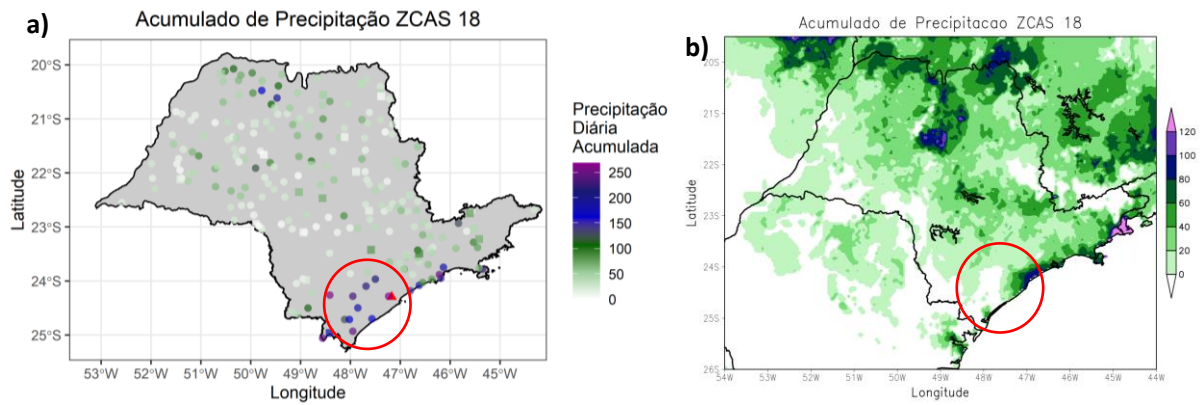


Figura A.9 – Vorticidade Relativa (10^{-4} s^{-1} , colorido) e linhas de corrente em: a) 700 hPa no dia 17 às 00Z; b) 650 hPa no dia 17 às 02Z; c) 700 hPa no dia 17 às 04Z; d) 600 hPa no dia 17 às 09Z; e) 600 hPa no dia 15 às 13Z; f) 500 hPa no dia 17 às 16Z; g) 550 hPa no dia 17 às 19Z; h)

600 hPa no dia 18 às 00Z; i) 600 hPa no dia 18 às 03Z; j) 650 hPa no dia 18 às 04Z; k) 600 hPa no dia 18 às 05Z; l) 650 hPa no dia 18 às 07Z de março de 2015

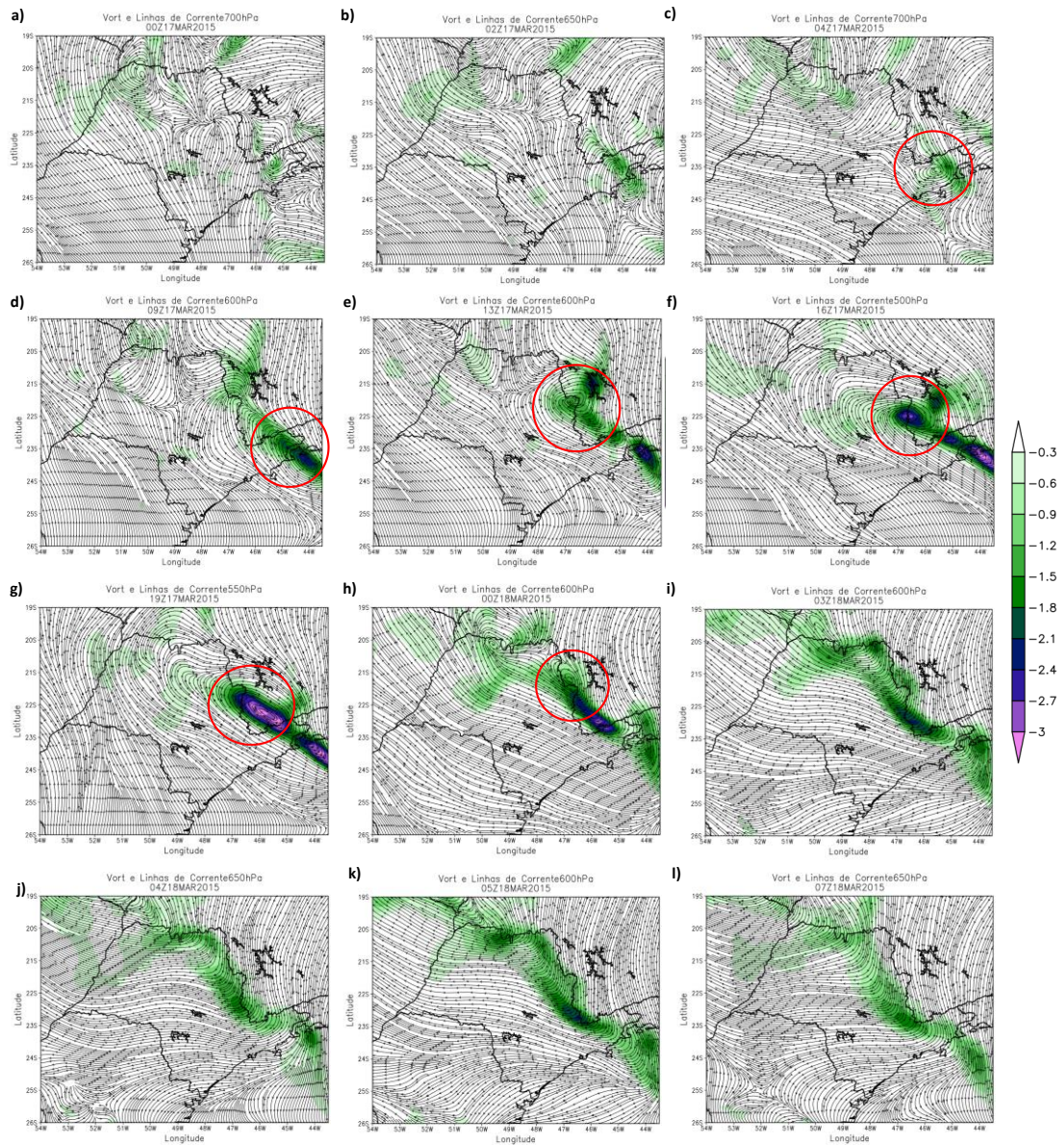


Figura A.10 - Acumulado de precipitação durante o evento de ZCAS (17 – 20 de março de 2015) nos conjuntos: a) Precipitação diária do INMET (marcados como quadrados) e

Precipitação diária do DAEE (marcados como círculos); b) Precipitação diária do CHIRPS. Os triângulos vermelhos em a) identificam os locais com DNs

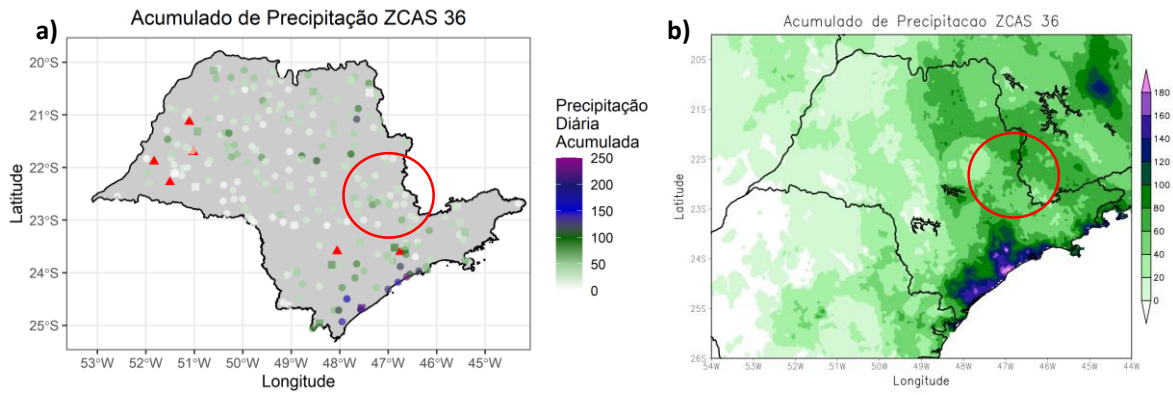


Figura A.11 - Vorticidade Relativa (10^{-4} s^{-1} , colorido) e linhas de corrente em: a) 450 hPa no dia 16 às 03Z; b) 400 hPa no dia 16 às 05Z; c) 400 hPa no dia 16 às 07Z; d) 450 hPa no dia 16 às 08Z; e) 450 hPa no dia 16 às 09Z; f) 400 hPa no dia 16 às 11Z; g) 650 hPa no dia 16 às 13Z;

h) 650 hPa no dia 16 às 14Z; i) 600 hPa no dia 16 às 16Z; j) 500 hPa no dia 16 às 18Z; k) 450 hPa no dia 16 às 20Z; l) 450 hPa no dia 16 às 21Z de janeiro de 2017

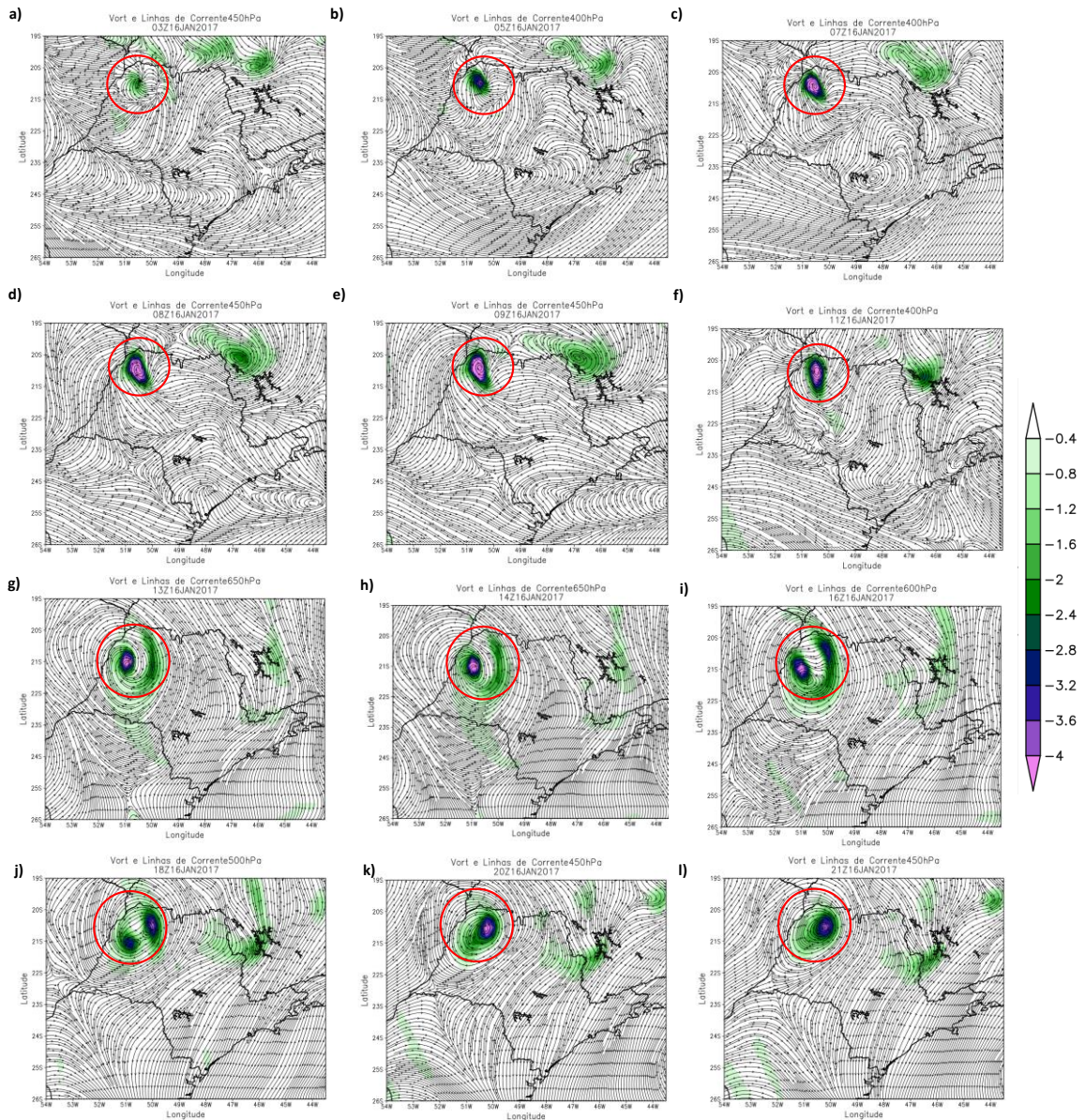


Figura A.12 - Acumulado de precipitação durante o evento de ZCAS (13 – 16 de janeiro de 2017) nos conjuntos: a) Precipitação diária do INMET (marcados como quadrados) e

Precipitação diária do DAEE (marcados como círculos); b) Precipitação diária do CHIRPS. Os triângulos vermelhos em a) identificam os locais com DNs

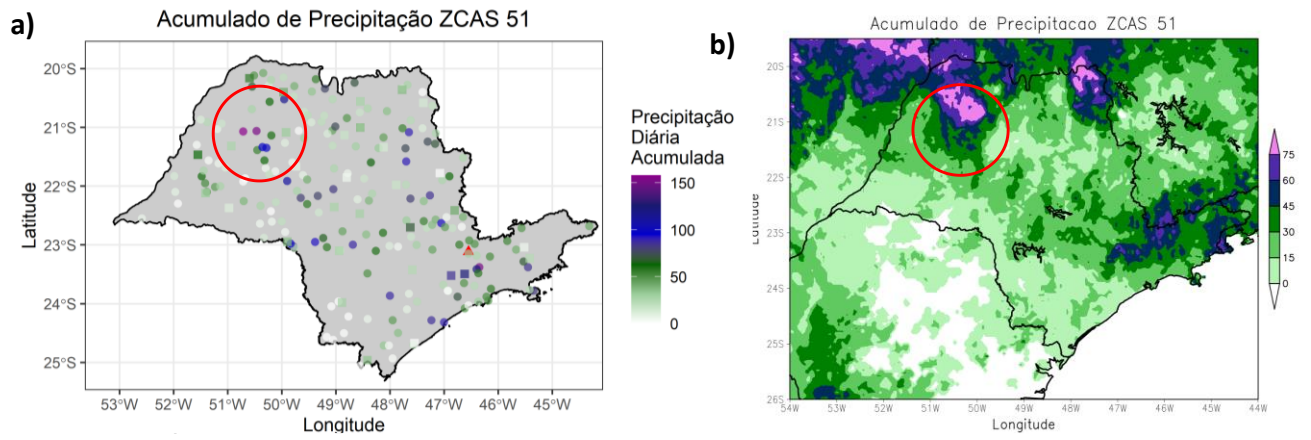


Figura A.13 - Vorticidade Relativa (10^{-4} s^{-1} , colorido) e linhas de corrente em: a) 800 hPa no dia 17 às 00Z; b) 800 hPa no dia 17 às 01Z; c) 800 hPa no dia 17 às 02Z; d) 850 hPa no dia 17

às 03Z; e) 800 hPa no dia 17 às 05Z; f) 700 hPa no dia 17 às 06Z; g) 850 hPa no dia 18 às 21Z; h) 850 hPa no dia 18 às 23Z; i) 650 hPa no dia 19 às 02Z; j) 850 hPa no dia 19 às 05Z; k) 850 hPa no dia 19 às 08Z; l) 850 hPa no dia 19 às 12Z de janeiro de 2017.

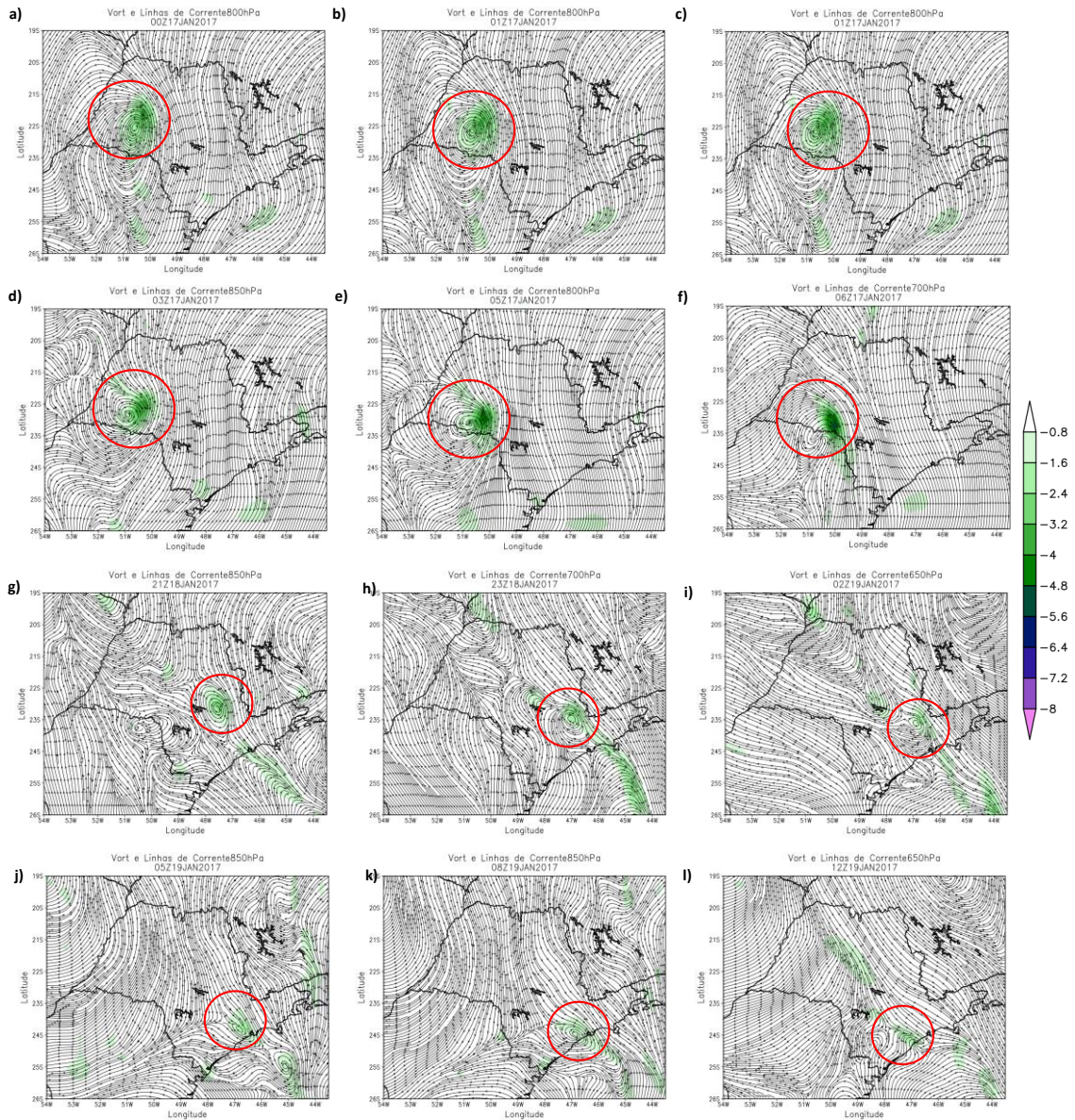


Figura A.14 - Vorticidade Relativa (10^{-4} s^{-1} , colorido) e linhas de corrente em: a) 850 hPa no dia 18 às 20Z; b) 850 hPa no dia 18 às 21Z; c) 700 hPa no dia 18 às 23Z; d) 650 hPa no dia 19 às 02Z; e) 850 hPa no dia 19 às 05Z; f) 850 hPa no dia 19 às 06Z; g) 850 hPa no dia 19 às 07Z;

h) 850 hPa no dia 19 às 08Z; i) 850 hPa no dia 19 às 09Z; j) 700 hPa no dia 19 às 10Z; k) 700 hPa no dia 19 às 11Z; l) 750 hPa no dia 19 às 12Z de janeiro de 2017.

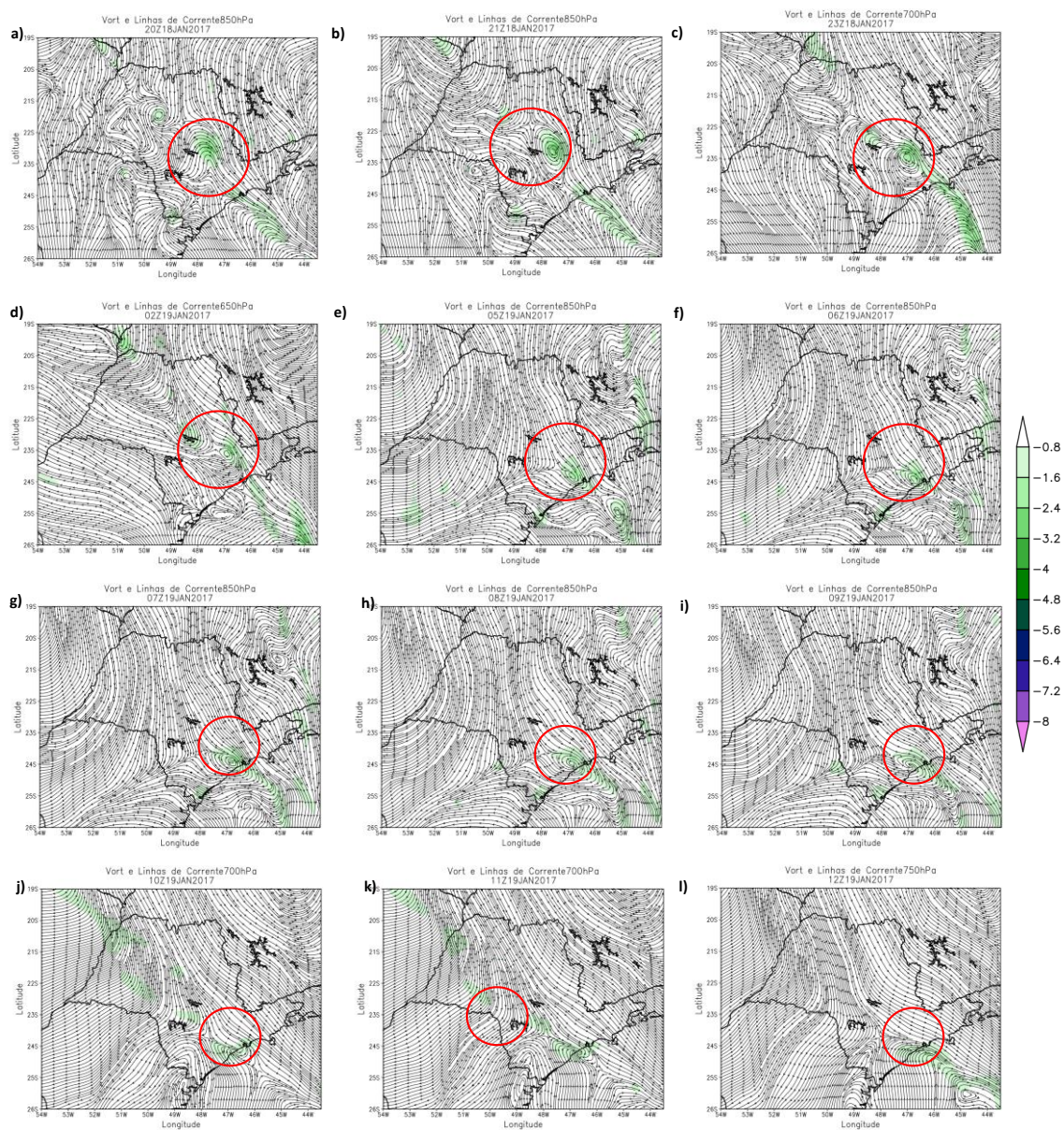


Figura A.15 – Acumulado de precipitação durante o evento de ZCAS (17 - 23 de janeiro de 2017) nos conjuntos: a) Precipitação diária do INMET (marcados como quadrados) e Precipitação diária do DAEE (marcados como círculos); b) Precipitação diária do CHIRPS. Os triângulos vermelhos em a) identificam os locais com DNs

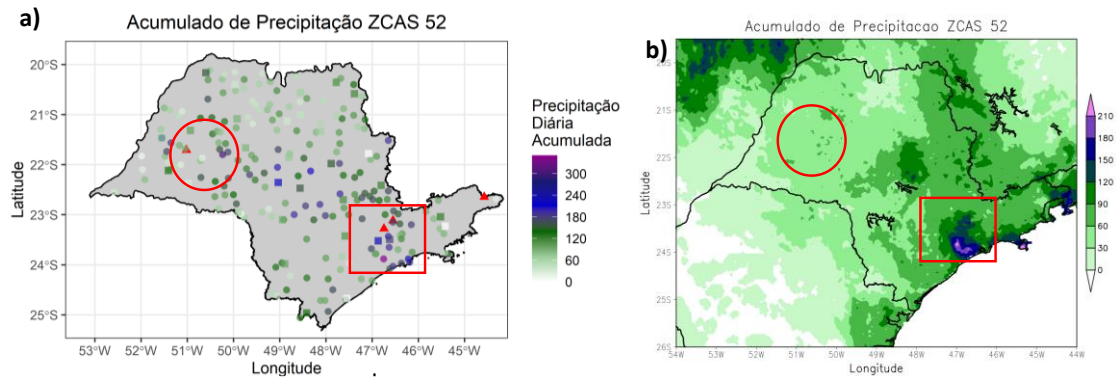


Figura A.16 – Vorticidade Relativa (10^{-4} s^{-1} , colorido) e linhas de corrente em: a) 700 hPa no dia 26 às 00Z; b) 700 hPa no dia 26 às 01Z; c) 700 hPa no dia 26 às 02Z; d) 700 hPa no dia 26 às 03Z; e) 600 hPa no dia 26 às 05Z; f) 550 hPa no dia 26 às 07Z; g) 600 hPa no dia 26 às 09Z;

h) 500 hPa no dia 26 às 11Z; i) 550 hPa no dia 26 às 13Z; j) 700 hPa no dia 26 às 14Z; k) 700 hPa no dia 26 às 15Z; l) 700 hPa no dia 26 às 16Z de fevereiro de 2017.

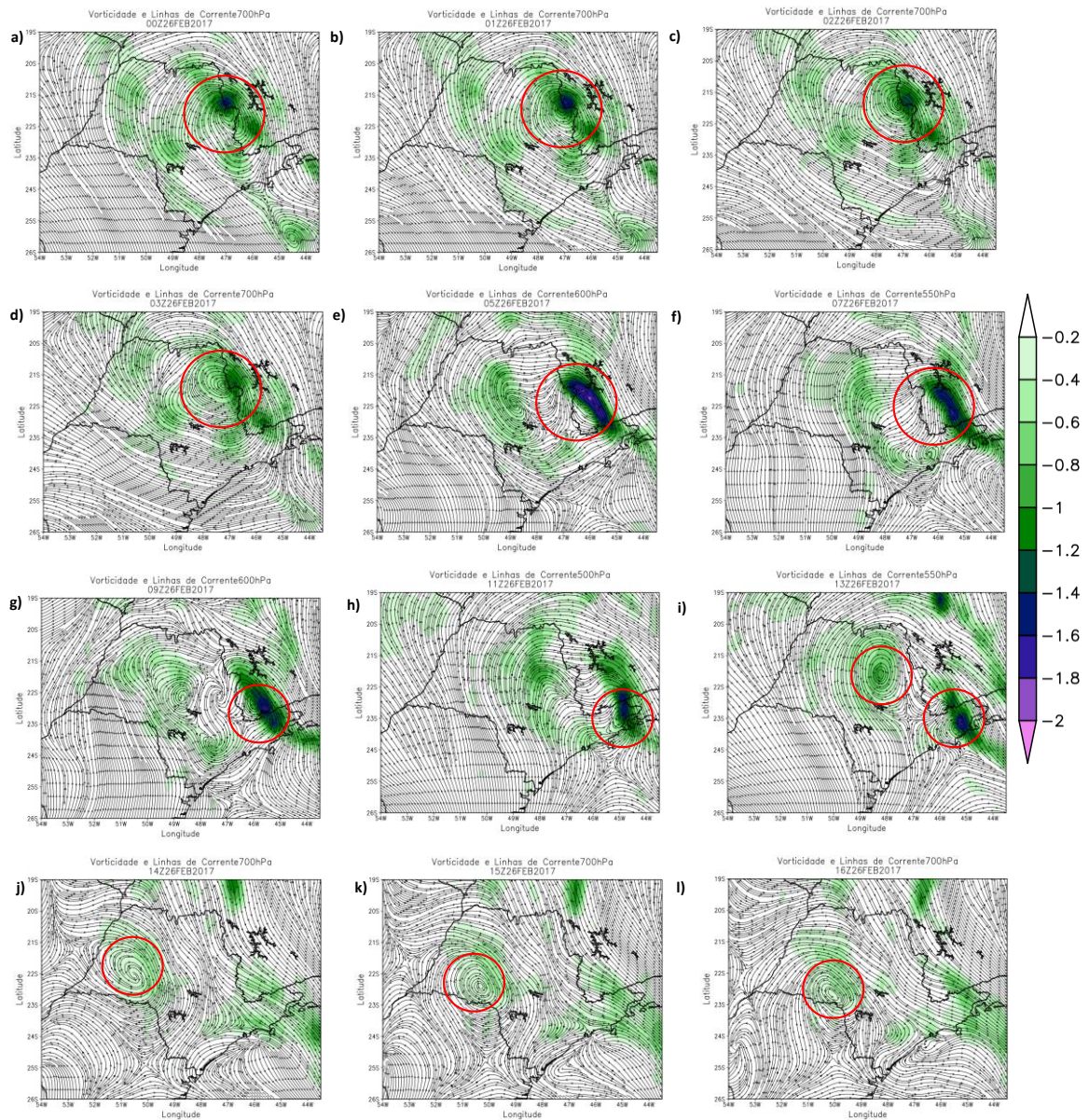


Figura A.17 - Acumulado de precipitação durante o evento de ZCAS (25 de fevereiro a 01 de março de 2017) nos conjuntos: a) Precipitação diária do INMET (marcados como quadrados) e

Precipitação diária do DAEE (marcados como círculos); b) Precipitação diária do CHIRPS. Os triângulos vermelhos em a) identificam os locais com DNs

